

**Megalithic Automation**  
Exploring the architectural potential  
of a single part structurally-aware construction system



**Megalithic Automation**  
**Exploring the architectural potential**  
**of a single part structurally-aware construction system**

Tesi di Laurea in Architettura e Composizione Architettonica  
Corso di Laurea di Ingegneria Edile-Architettura  
Scuola di Ingegneria e Architettura  
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna  
a.a. 2020-21

Relatore: Alessio Erioli

Candidato: Riccardo Barelli



*Era l'ansia di non arrivare in tempo,  
era un acuto bisogno di futuro*

Vittorio Foa, *Passaggi*



# Indice

<b>Abstract</b>	<b>05</b>
<b>0. Premessa</b>	<b>07</b>
<b>1. Assemblaggi</b>	<b>15</b>
1.1 Emergenza	
1.2 Digital & Discrete	
1.3 Assemblaggi	
<b>2. Applicazione digitale</b>	<b>27</b>
2.1 Premessa	
2.2 Parametri esogeni	
2.3 Parametri endogeni	
2.4 Post-produzione	
2.5 Valutazione	
<b>3. Materiale</b>	<b>61</b>
3.1 Premessa	
3.2 CLT	
<b>4. Applicazioni Architettoniche</b>	<b>71</b>
4.1 Utilizzo	
<b>5. Conclusioni</b>	<b>85</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>87</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>89</b>



## Abstract

Questa tesi vuole esplorare le capacità architettoniche di un sistema costruttivo dotato di coerenza strutturale intrinseca, pensato per un processo di costruzione automatizzato. Il sistema si basa su un singolo elemento modulare costruito con pannelli di CLT (Cross Laminated Timber). A partire dallo studio della geometria e connettività dell'elemento, si esplorano le qualità spaziali emergenti che l'assemblaggio può descrivere, guidato da procedure e criteri che ne regolano crescita e limiti all'interno di un sistema algoritmico sviluppato ad-hoc. L'assemblaggio è guidato da regole locali che determinano i modi in cui gli elementi possono collegarsi l'uno con l'altro e da criteri di scelta del punto di crescita e della regola da applicare. I criteri tengono conto anche della coerenza strutturale, valutando iterativamente lo stato di deformazione del sistema, e spostando il punto di crescita nelle zone in cui la deformazione è massima. Il sistema non segue uno schema spaziale predefinito ma genera spazi attraverso il proprio processo di crescita; tali spazi possono essere mappati quali effetti di regole e criteri che il sistema ha adottato per crescere, filtrandole opportunamente in iterazioni successive in modo da poter indirizzare il sistema a convergere verso particolari organizzazioni spaziali. Si indagano quindi le proprietà emergenti che il sistema può esibire in ambito architettonico inserendo la coerenza strutturale come criterio filtrante intrinseco in un processo di assemblaggio.



Habitat 67, Montréal 1967.  
M. Safdie

## 0. Premessa

“You could settle for the surface, decorate it, upload it with texture. Or you could take a risk, resist and go for the volume, the structure behind it.”

Retsin G. 2016, 1.

Con queste parole viene commentata l'esposizione che Rem Koolhaas realizza per la Biennale di Venezia del 2014. Nell'intenzione dell'architetto c'era forse il voler mettere in rilievo lo scostamento tra ciò che è rappresentato e messo in mostra, ovvero una superficie continua, e ciò che invece viene nascosto, cioè l'apparato tecnologico che si risparmia al fruitore dell'architettura. Spingendosi nell'interpretazione del manufatto però, si trova anche una critica alla logica costruttiva duale che vede un edificio costituito da un involucro sostenuto da un telaio. La sfida implicita proposta al progettista che vede questa esposizione è di riflettere sul suo ruolo e sulla possibilità che questo gli conferisce nella progettazione: ci si chiede quindi se il proprio ruolo sia quello di decoratore dell'involucro o se non esista un modo per superare questa dualità nella progettazione degli spazi che quotidianamente si vivono.

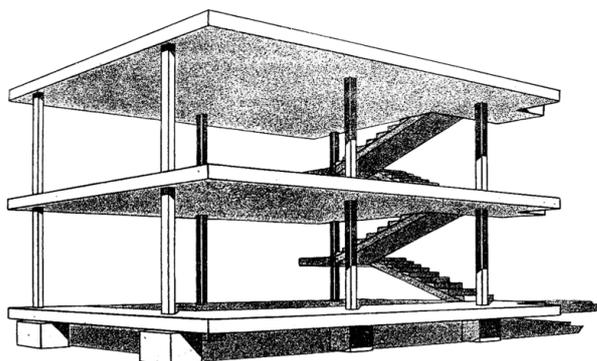


Questa discussione affonda le sue radici nel ventesimo secolo, a partire dalla proposta della Maison Dom-ino di Le Corbusier. Il sistema infatti, giocando con il riferimento letterale alle tessere del domino, predisponeva un progetto libero dello spazio interno, grazie alla struttura a telaio in cemento armato, formando quello che veniva descritto come:

Fundamentals, Venezia 2014.  
R. Koolhaas

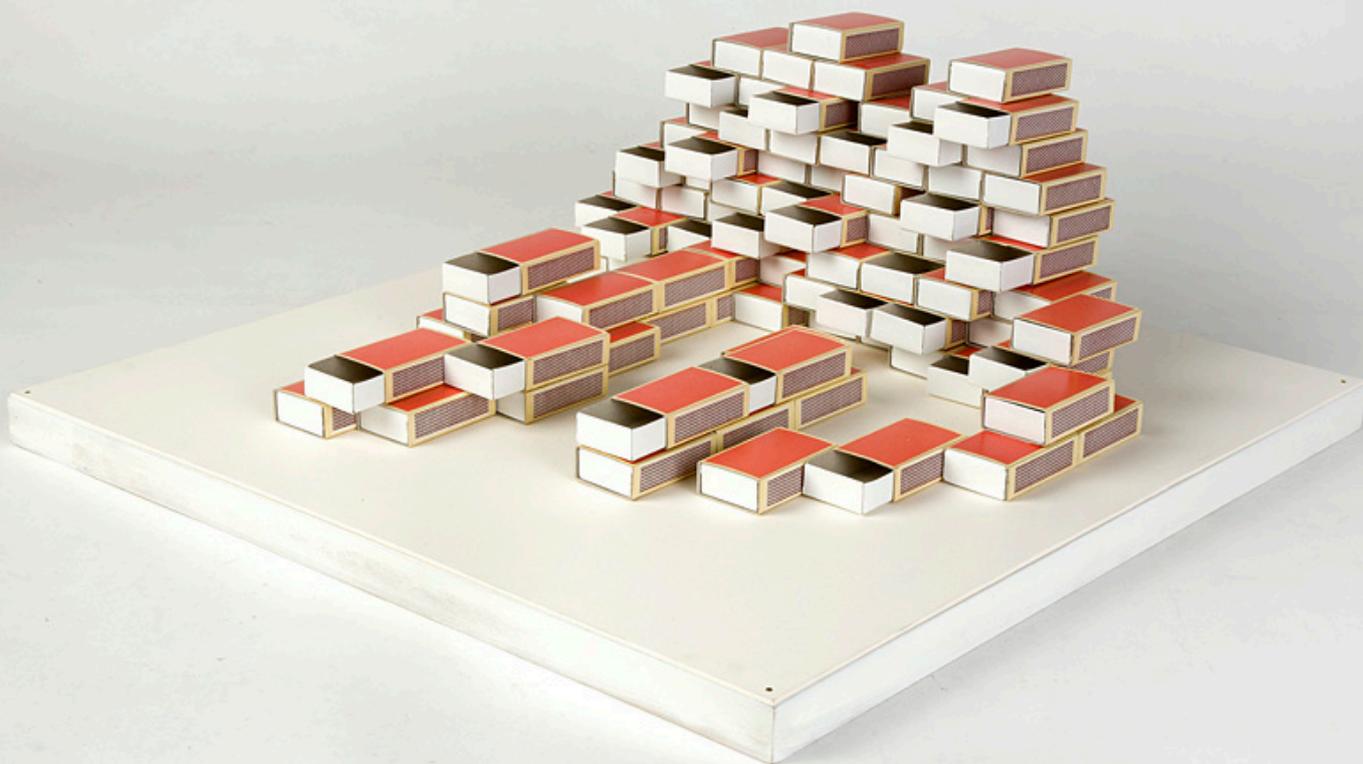
“Sistema di costruzione intellettuale dove scompaiono le nozioni di “stanze” e “corridoio” sostituite da quelle di “funzione” e “organo a circolazione orizzontale”

Pierre Blareau 2003, 73



Maison Dom-ino, 1914.  
Le Corbusier

È da menzionare successivamente l'approccio che nasce dalle riflessioni del Team 10, evolutosi dall'eredità dei Congressi Internazionali di Architettura Moderna. In particolare nella corrente olandese portata avanti tra gli altri da Aldo Van Eyck e Herman Hertzberger. Il lavoro svolto presso la rivista Forum getta le fondamenta per la corrente che verrà definita per la prima volta nel 1969 Strutturalismo, e porta alla riflessione precedente degli esempi come le Repeated Living Cells, un modello architettonico che gioca sulla ripetizione per indagare il modello di costruzione locale tipico di quegli anni



La strada percorsa da Retsin, nel tentativo di sfidare la concezione tradizionale di dualità involucro-telaio, si rivolge alla teoria degli assemblaggi passando per i concetti di digitale e discrete.

Repeated Living Cells, 1959.  
H. Hertzberger

La nozione di assemblaggio ha una storia recente: l'espressione è coniata negli anni settanta dal filosofo Gilles Deleuze che scrive in collaborazione con lo psicanalista Félix Guattari. L'espressione deriva dal francese *agencement*, utilizzata nell'opera *Mille Plateaux*:

“Gli assemblaggi, come concepiti da Deleuze and Guattari, sono complesse costellazioni di oggetti, corpi, espressioni, qualità, e territori, che si compongono per periodi variabili per creare nuovi funzionamenti”

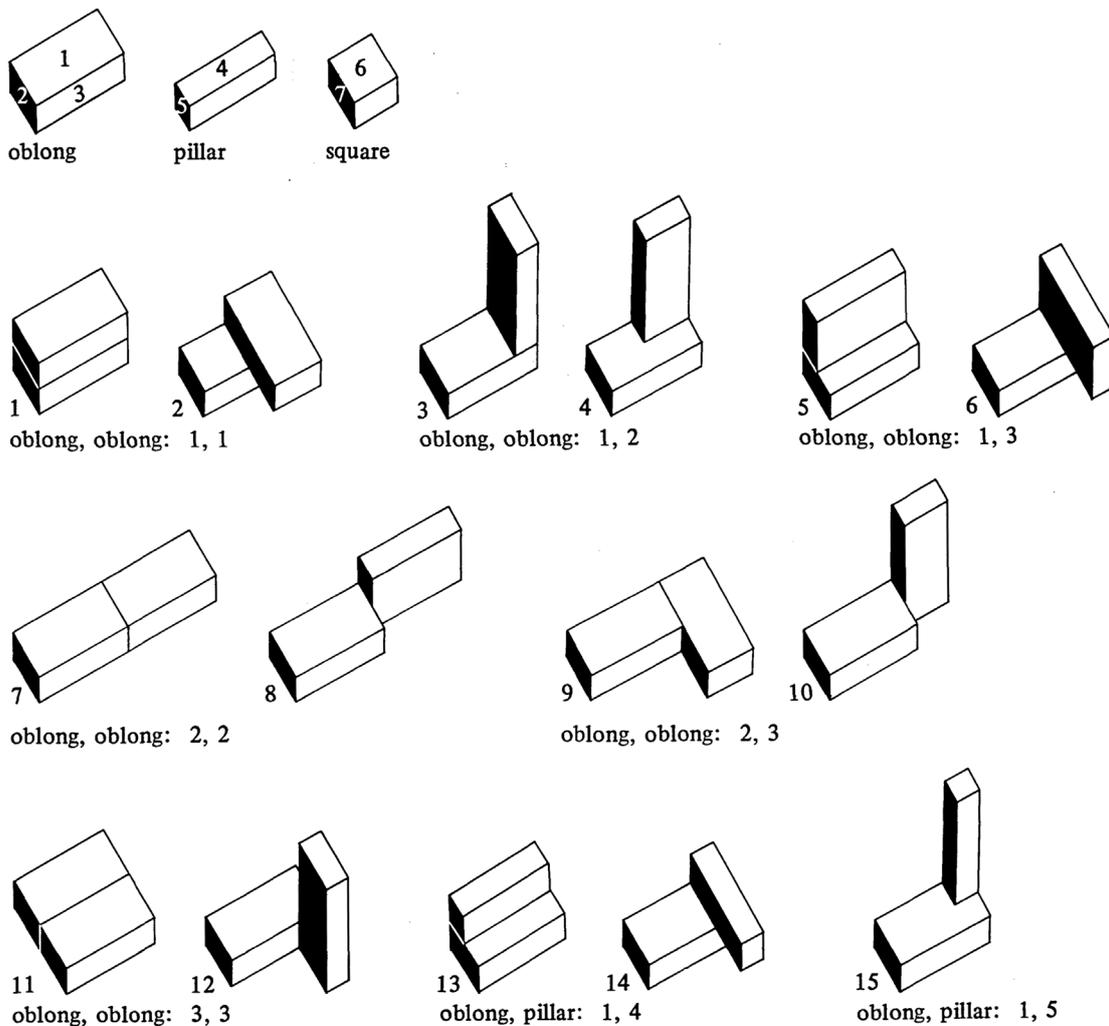
Livesey 2010, 18.

L'opera da costruirsi così configurata perde nel suo sviluppo la concezione duale di un sostegno portante funzionale all'appendimento dell'involucro da esso separato, a favore di una collezione di elementi discreti che nel loro assemblarsi attraverso regole prestabilite danno luogo all'oggetto finale. La distinzione citata in precedenza perde quindi la sua nettezza a favore di una più sfumata coesistenza delle due parti nell'assemblaggio totale. Si considera quindi di lavorare con un sistema le cui parti non sono funzionalmente definite a priori ma assumono un ruolo nella loro posizione all'interno dell'intero.

I primi esperimenti con le modalità combinatorie per i processi di design risalgono al 1980 ad opera di George Stiny. Vengono qui definite infatti per la prima volta le grammatiche di composizione degli oggetti, in questo caso dei doni di Fröbel. La scelta di questi oggetti non è casuale: le loro forme studiate per il *Kindergarten* potevano essere facilmente utilizzate per una catalogazione delle varie modalità di assemblaggio degli oggetti stessi.

Viene richiesta una definizione rigorosa del materiale di partenza, dalla sua forma alle connessioni prestabilite che consentono il processo di assemblaggio. In questa maniera viene utilizzato il concetto di materiale digitale, nella misura di un materiale che trova il suo utilizzo con un preciso set di relazioni con gli altri pezzi del costruito.

Le proprietà emergenti dell'assemblaggio sono osservabili alla macroscale come risultato delle interazioni alla microscale, e hanno come peculiarità il fatto di non essere prevedibili a partire dai soli elementi costituenti, ma dipendenti dal set di regole e parametri che viene imposto a priori, e che genera in seguito l'architettura proposta. A guidare il processo di assemblaggio proposto in questo lavoro di ricerca, che prende spunto dal dibattito sopracitato, è oltre al set di regole prede-



finite per ogni pezzo che ne definiscono la propria connettività, una logica di coerenza strutturale che si configura come filtro e ne permea l'iterare.

Kindergarten grammars, 1980.  
G. Stiny

Nella prima parte verrà quindi esplorato il dibattito tra digital e discrete, mettendo in risalto i ruoli chiave di questi concetti nel discorso più generale degli assemblaggi. Facendo questo si studia quindi un sistema che a partire da una griglia di oggetti predefinita, dotati di un set di regole preciso, può generare nella molteplicità una quantità di spazi architettonici che non sono predeterminati, dove l'intenzionalità del progettista è inserita nella costituzione di criteri granulari che vengono poi eseguiti sistematicamente da un algoritmo. Si tenta in questa maniera di esplorare le ricadute che una logica che procede per pezzi discreti può avere sull'architettura, a partire da una riflessione sul concetto di emergence e applicandolo a un sistema aperto nell'intenzione finale. Si sviluppa inoltre

un modello strutturale parallelo in grado di generare all'interno dell'assemblaggio un processo di feedback continuo che monitora e segnala all'interno dell'assemblaggio i punti di vulnerabilità, secondo il parametro della deformazione massima.

Questo lavoro di ricerca si propone quindi di indagare le possibilità architettoniche che un sistema assemblato può sviluppare se governato da un procedimento anesatto, inteso come procedimento fornito di precise regole non mirato al raggiungimento preciso di un risultato formale.





Stormo di uccelli in volo

# 1. Assemblaggi

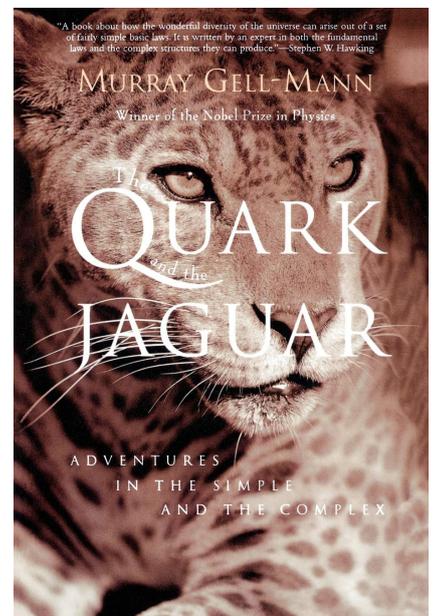
## 1.1 Emergence

Il termine Emergence descrive la comparsa in un sistema di proprietà non appartenenti a nessuna delle sue parti costituenti. Lo studio delle caratteristiche emergenti si lega inevitabilmente a un sistema del quale riconoscerle.

“Emergence is a common feature of complex adaptive systems (cas) - ant colonies, networks of neurons, the immune system, the Internet, and the global economy, to name a few - where the behavior of the whole is much more complex than the behavior of its parts.”

Holland J. 1997, 12.

La definizione di Complex Adaptive System nasce per mano di Murray Gell-Mann nel 1994 nello scritto “The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex”: si considera un Sistema Adattivo Complesso un sistema costituito da tanti elementi, i quali possono essere a loro volta semplici o complessi, relazionati in un network di azioni e retroazioni regolate da leggi a livello locale, che scambia informazioni o energia con l’ambiente. Si considera inoltre che sia in uno stato dinamico e che lavori lontano da un equilibrio statico.



The Quark and the Jaguar, 1994.  
M. Gell-Mann

In un sistema così definito, gli elementi non sono coordinati centralmente ma si forma una rete di interazioni gestite da comportamenti locali. Si viene a formare una *Swarm Intelligence*, termine che nasce nel contesto della cibernetica per descrivere i comportamenti di Sistemi Cellulari Robotici, analizzati da Gerardo Beni e Jing Wang. Da questi studi si comprende l'utilità dei concetti di *Swarm Intelligence* e *Emergenze* nella descrizione di sistemi biologici.

Esempi di sistemi emergenti sono molti sistemi biologici e naturali: dal comportamento dello stormo di uccelli in volo a quello di un banco di pesci in acqua, fino all'organizzazione degli insetti sociali come le formiche o le termiti. Altri esempi sono i network neuronali o i sistemi economici, sistemi dove l'auto-organizzazione assume forme meno tangibili ma comunque in grado di dare vita a posteriori a proprietà emergenti.

Ant Colony



Proprio perché queste proprietà non possono essere previste realizzando un'istantanea del sistema ad un qualsiasi punto zero, il comportamento dei sistemi complessi può solo essere esplorato attraverso l'indagine ed attuazione delle leggi che governano le interrelazioni tra i membri del sistema e assume una grande importanza per quelle che sono le loro ricadute pratiche e euristiche.

Nel corso del XX sec. lo studio della complessità trova infatti il supporto dello strumento informatico, producendo vari studi in cui sistemi complessi vengono simulati attraverso l'ausilio della computazione. Alcuni esempi sono il modello World3, utilizzato per redarre il report Limits To Growth del 1972, oppure il programma Boids, sviluppato nel 1986 da Craig Reynolds per simulare il comportamento di flocking proprio di stormi, branchi, greggi e formazioni collettive di animali in genere.

Lo studio delle proprietà emergenti assume in questo contesto una valenza architettonica data la natura del sistema, e l'indagine viene condotta attraverso la simulazione di un sistema costruttivo dove i membri sono gli oggetti dell'assemblaggio e le regole a livello locale sono sia relazioni interne tra i pezzi dell'assemblaggio sia le condizioni che ogni membro deve rispettare nei confronti dell'ambiente.



## 1.2 Digital & Discrete

Le nozioni di Digital e Discrete accompagnano questa ricerca come passaggio concettuale dalla riflessione sulle proprietà emergenti e i sistemi complessi a quello degli assemblaggi. Definendo un oggetto “discreto” si fa riferimento al suo essere, in relazione ai propri vicini, discontinuo, chiaramente definito e con soluzione di continuità rispetto ad essi. Al contrario è continuo ciò che non presenta divisioni, la cui percezione non si scinde in molteplici percezioni elementari.

La definizione di “digitale” si riferisce invece al modo in cui una grandezza viene rappresentata: è una qualifica data al trattamento di dati forma numerica. Un'altra forma di rappresentazione di valori è quella “analogica”, dove si utilizza un modello misurabile, che simuli l'evento di interesse (in maniera appunto *analogica*), per estrapolarne un valore. La contrapposizione tra digitale e analogico ha preso piede nel senso comune, ma nel loro significato rimangono due qualifiche date alla rappresentazione di una grandezza.

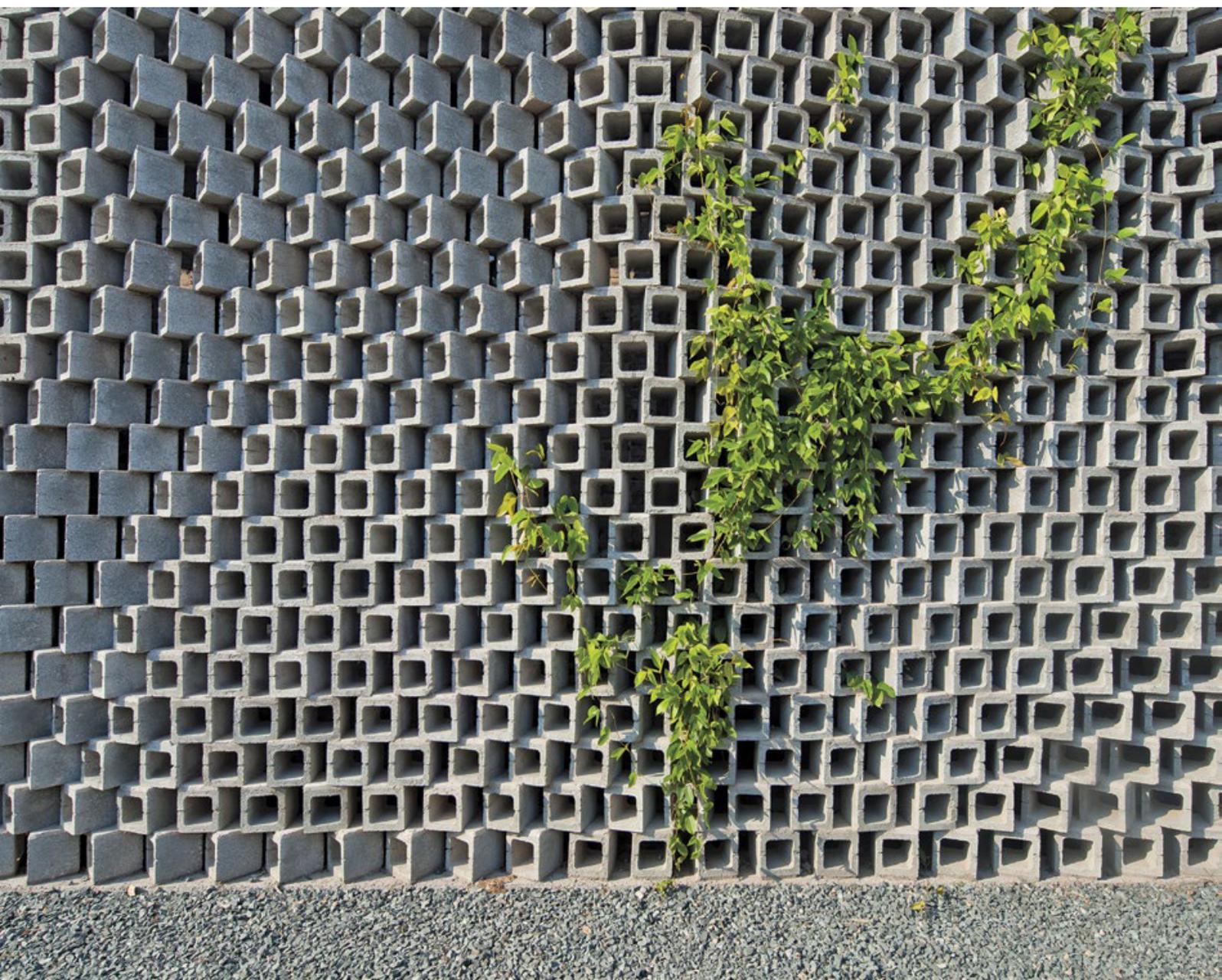
L'utilizzo di uno strumento digitale presuppone la digitalizzazione del materiale sul quale si costruisce il lavoro di ricerca; un passaggio necessario, quindi, è interrogarsi su che tipologia di oggetto si stia trattando. Cosa significa infatti parlare di “Materiale Digitale”, quando l'aggettivo rimanda a una serie di connotazioni che tutto hanno tranne che di materiale e tangibile? La nozione di materiale digitale viene infatti messa in discussione nella sua applicazione all'architettura:

“This is not to say that there cannot be digital designs of buildings, but these designs are in effect immaterial models. Buildings themselves are analogue.”

Leach N. 2019, 141.

L'utilizzo della parola “digitale” accostata al concetto di materialità, infatti, provoca una confusione inconciliabile con la chiarezza necessaria nel trattare un argomento che raccorda più discipline, e si considera in questo lavoro come materiale digitale un oggetto che rimanendo analogico per la sua materialità, può essere considerato digitale se impiegato come oggetto discreto con un limitato set di interazioni possibili con i suoi vicini nell'atto di realizzare un sistema complesso sulla base di tali interazioni.

Silk Wall, Shanghai 2010  
Archi-Union Architects

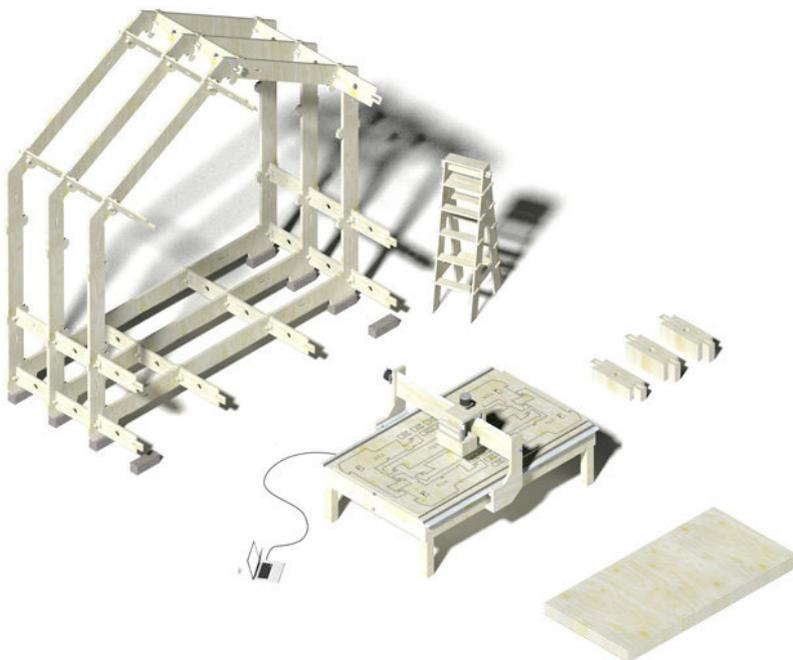


“We define a digital material as a discrete set of components that can be of any size and shape, made out of various materials and that can fit together in various ways (press fit, friction fit, snap fit, reflow binding, etc.). “

Popescu G., Mahale T., Gershenfeld N., 2006, 1.

La definizione di materiale digitale in questo contesto presuppone quindi da una parte l'oggetto discreto, dall'altra coinvolge le interazioni di questo oggetto con i suoi vicini, a loro volta oggetti discreti e comparabili.

La discretizzazione degli elementi e del sistema ipotizzata, supportata da una distribuzione e un'accessibilità allargata di questo tipo di conoscenze, apre le porte a una riflessione sulla democratizzazione del processo costruttivo: il progetto di un sistema costituito da parti facilmente replicabili in diverse sedi e con un basso livello di specializzazione della manodopera addetta al montaggio porta a un modo di costruire più accessibile, includendo quella parte di base della domanda che con tecniche tradizionali rimane esclusa. Un ragionamento simile è portato avanti dal progetto WikiHouse, che propone un “sistema costruttivo digitale [...] che punta a rendere semplice per chiunque progettare, produrre e assemblare case ad alta performance”, passando attraverso il design delle parti perché esse siano realizzabili economicamente con una macchina a controllo numerico.



Componenti WikiHouse

Attualmente però il costo di produzione di una casa con questo procedimento ancora non scende sotto un manufatto costruito con tecniche tradizionali, di fatto rendendo vana la promessa di maggiore accessibilità dell'oggetto.

Typical performance comparison	
Concrete, brick & block	WikiHouse
build cost £1100-1600/m <sup>2</sup>	build cost £1100-1600/m <sup>2</sup>
project cost certainty low	project cost certainty medium-high
construction time 6-9 months	construction time 8-12 weeks
construction skill level high	construction skill level low
U-value 0.3 W/m <sup>2</sup> K	U-value 0.15 W/m <sup>2</sup> K
Air leakage 8-10 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup>	Air leakage 1-3 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup>
Carbon footprint 350-500 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	Carbon footprint 150-250 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
Reuseable components 0-10%	Reuseable components 80-90%

Costi di produzione WikiHouse, da WikiHouse

La riflessione su una possibile democratizzazione del processo costruttivo previo utilizzo di un approccio con elementi discreti va affrontata in maniera interdisciplinare, abbinando a una questione prettamente architettonica ragionamenti di carattere più politico-economico. Questa riflessione, scaturendo da una domanda di design, interseca nel suo procedere la distribuzione dei mezzi di produzione e più in generale una riflessione sul sistema economico nel quale il paradigma discreto andrebbe a inserirsi. Questo discorso, data la trasversalità che lo caratterizza, merita di essere approfondito in una ricerca dedicata, e per tale ragione l'approccio di questo lavoro di ricerca sarà improntato alle ricadute di carattere architettonico che un sistema discreto è in grado di produrre.

## 1.3 Assemblaggi

La riflessione sugli assemblaggi si radica nelle nozioni di parte e sistema: attraverso la riflessione precedente sul concetto di discreto si è posto il focus sulla parte, mentre parlando di proprietà emergenti si introducono dei temi propri dell'assemblaggio, inteso come un'entità costituita da parti distinte in relazione tra di loro.

Stabilita l'importanza di queste parole chiave ci si interroga sulle relazioni che intercorrono tra le parti e il tutto, ovvero come l'identità della singola parte giochi un ruolo nell'identificazione dell'assemblaggio, e quanto le qualifiche che si danno al sistema totale abbiano carattere determinante per le singole parti.

Sarebbe riduttivo pensare che le qualità proprie di un sistema siano la semplice somma delle qualità individuali delle parti. In un assemblaggio esistono infatti caratteristiche che non sono riducibili a quelle dei propri componenti.

È altresì improprio e anche assurdo, in maniera più evidente, derivare ogni qualifica delle parti dalla totalità, perché l'analisi del sistema non fornisce informazioni in maniera esaustiva sulla singola parte.

In generale si assume che le proprietà dell'assemblaggio non siano riducibili alle sue parti. Il filosofo Manuel DeLanda scrive in questo senso:

“In fact, the reason why the properties of a whole cannot be reduced to those of its parts is that they are the result not of an aggregation of the components own properties but of the actual exercise of their capacities.”

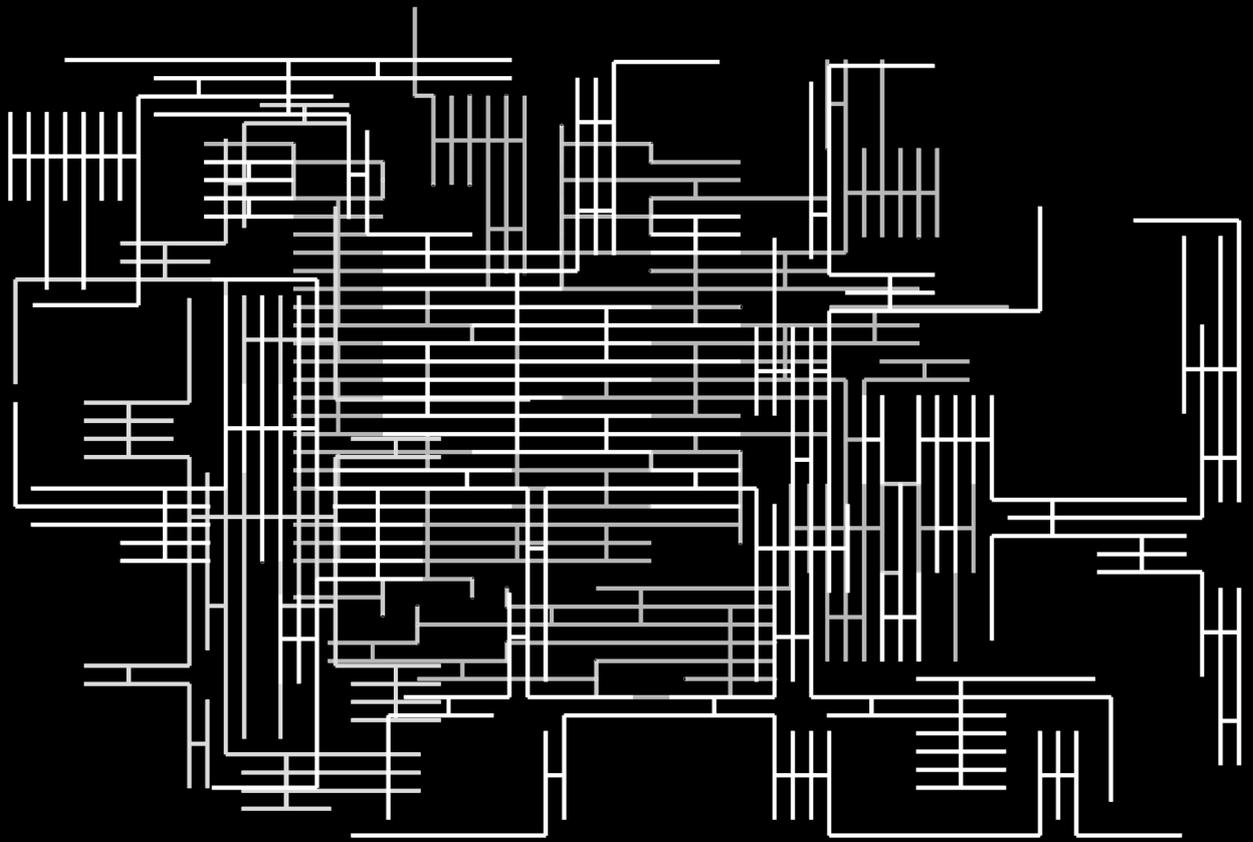
DeLanda M., 2006, 11.

In questo estratto del suo trattato, De Landa, commentando l'alternativa deleuziana alla totalità organica, descrive due caratteristiche della parte: le capacità e le proprietà. Le proprietà sono date e numerabili a partire dall'entità di base, mentre le capacità sono intese come capacità di interagire con altre entità, e dipendono appunto dalla relazione con le parti vicine. Un esempio pratico di queste caratteristiche è quello del coltello: una proprietà del coltello è quella di essere tagliente, mentre una sua capacità è quella di tagliare degli oggetti. La proprietà di essere affilato è indipendente dal contesto in cui è posto il coltello, mentre il tagliare altri oggetti dipende dal modo in cui il coltello viene utilizzato.

Questo punto di vista viene rafforzato nel supporto che De Landa offre alla critica deleuziana dei rapporti di interiorità nel considerare gli interi. Infatti, il filosofo francese propone di considerare piuttosto relazioni di esteriorità per le parti, che comportano la possibilità di un elemento di venire tolto da un certo assemblaggio e posto in uno diverso cambiando le sue interazioni.

Si inserisce in quest'ottica l'ideazione di un sistema costruttivo di parti dotate di un set di regole predefinito per le loro interazioni, al fine di studiare il potenziale architettonico sviluppabile come proprietà emergente nell'accrescimento dell'assemblaggio.





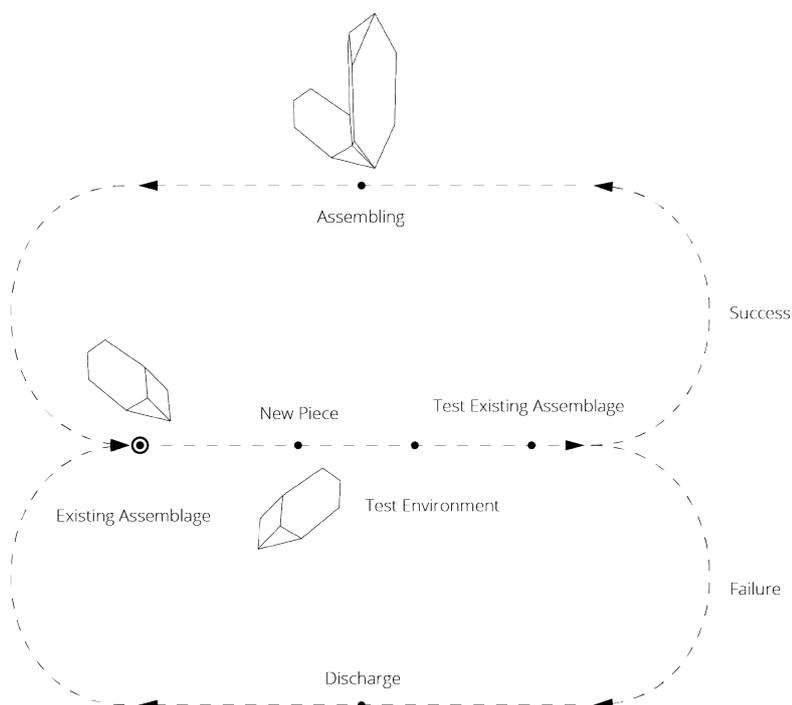
Modello strutturale del sistema

## 2. Applicazione Digitale

### 2.1 Premessa

L'accrescimento dell'assemblaggio avviene posizionando iterativamente i moduli secondo le regole prestabilite, verificando una serie di requisiti prima che l'elemento venga inserito nell'insieme. In generale, il comportamento dell'assemblaggio deriva da due tipologie di parametri, esogeni e endogeni. I parametri esogeni influenzano i risultati del sistema dall'esterno, mentre quelli endogeni agiscono dall'interno.

Il seguente schema rappresenta graficamente il processo che viene iterato.



Processo illustrato

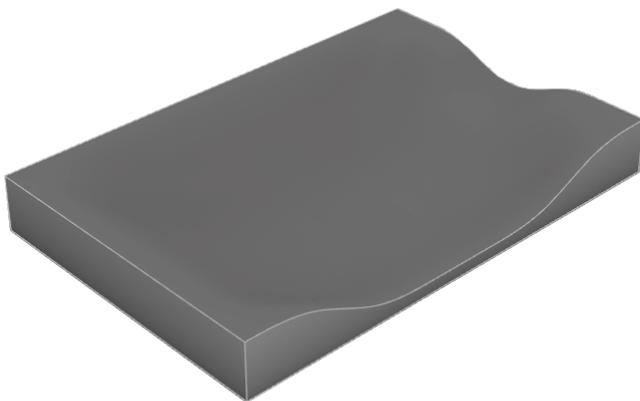


## 2.2 Parametri Esogeni

Si indicano con parametri esogeni quei fattori che influenzano il processo dall'esterno. In particolare si individua l'ambiente con il quale l'assemblaggio comunica e le informazioni che con esso scambia.

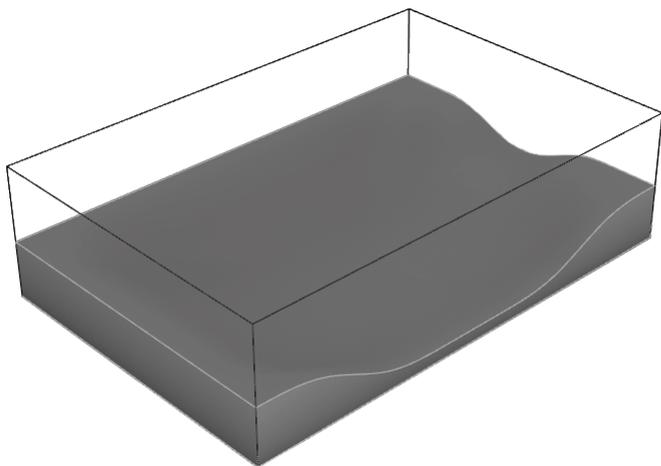
### **Ambiente.**

X si muove all'interno di un ambiente che rappresenta il terreno, con il quale interagisce con una regola di non penetrazione, assicurando che l'assemblaggio resti al di sopra dello stesso.

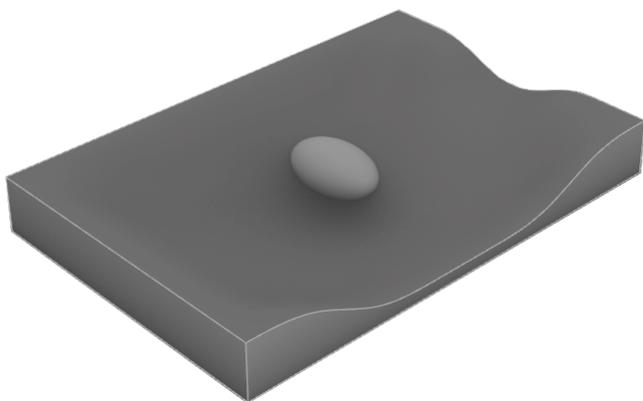


## Limiti.

Si sceglie di porre un limite alla crescita del sistema estrapolando i limiti volumetrici dal terreno preso in considerazione; in particolare i confini laterali coincidono con le dimensioni dell'area del terreno, mentre lo sviluppo in altezza può essere variato.



## Vuoti.

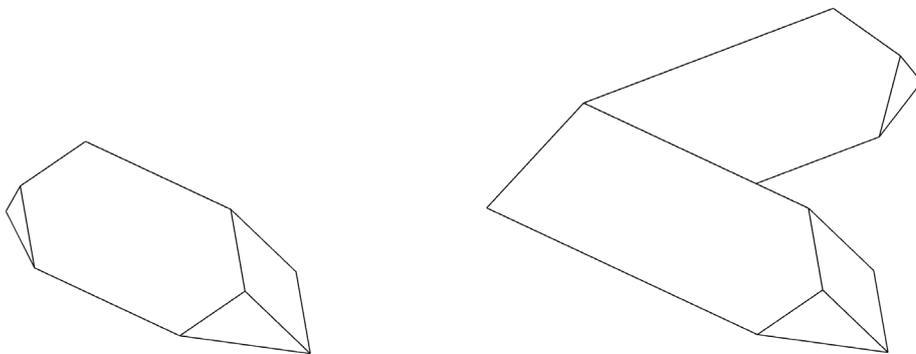


## 2.3 Parametri Endogeni

Si indicano con endogeni quei parametri che influenzano il processo dall'interno.

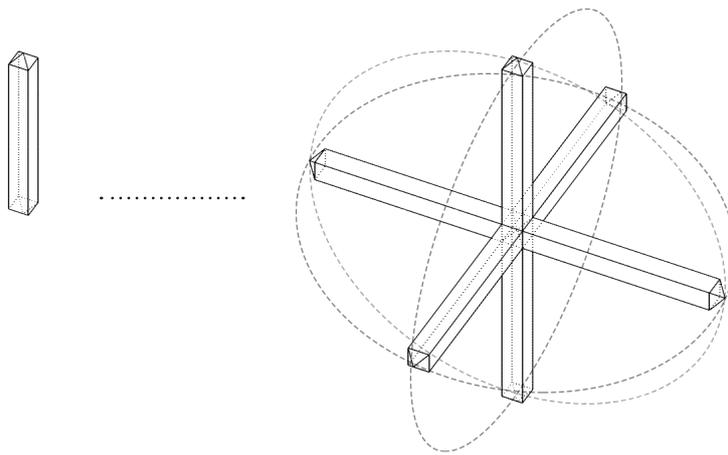
### **Geometria.**

Il primo fattore da considerare è la geometria scelta per il pezzo: a cascata infatti questa influenzerà le connessioni in grado di prodursi e di conseguenza le proprietà dell'assemblaggio che emergeranno.

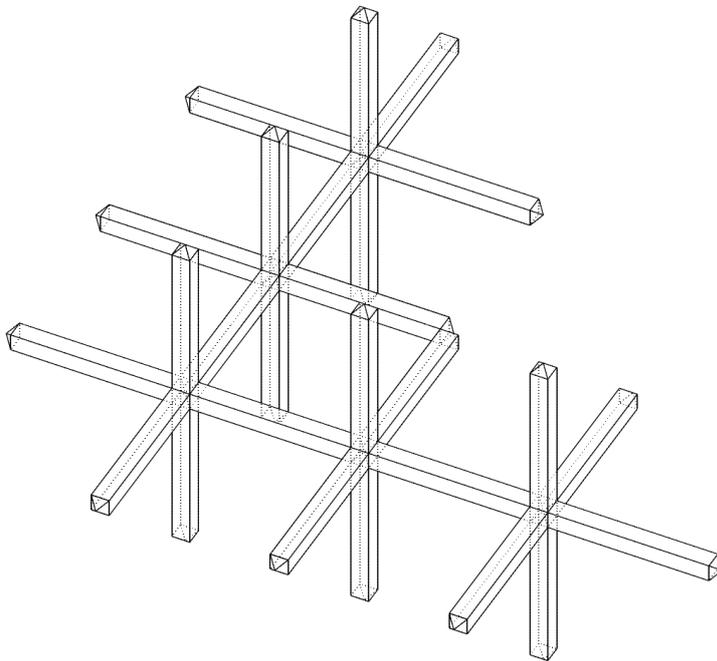


Geometrie scelte

La scelta della geometria da utilizzarsi è il termine di un processo di studio della forma, sperimentando parallelamente le intenzioni del progetto. Ci si è da subito orientati verso una geometria solida longilinea, studiandone le caratteristiche spaziali nel rapporto con se stessa:

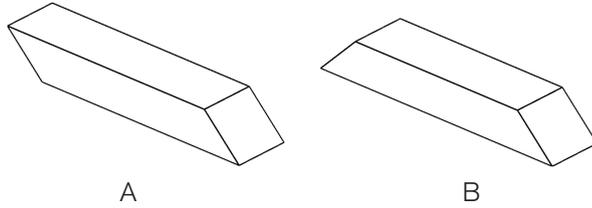


Assemblaggio per rotazione

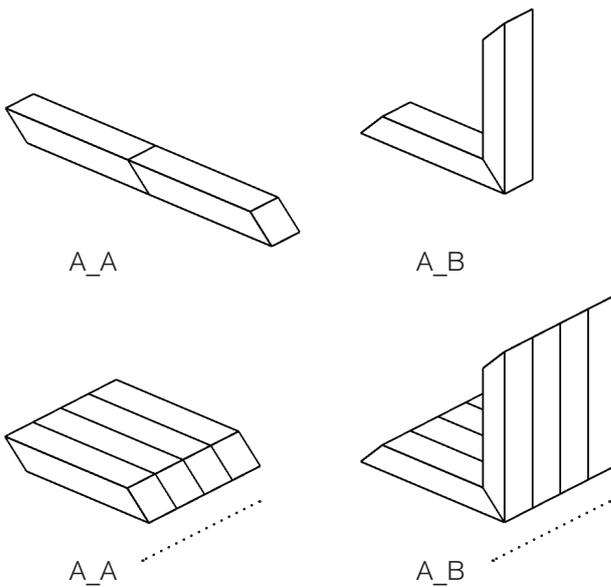


Assemblaggio per accostamento

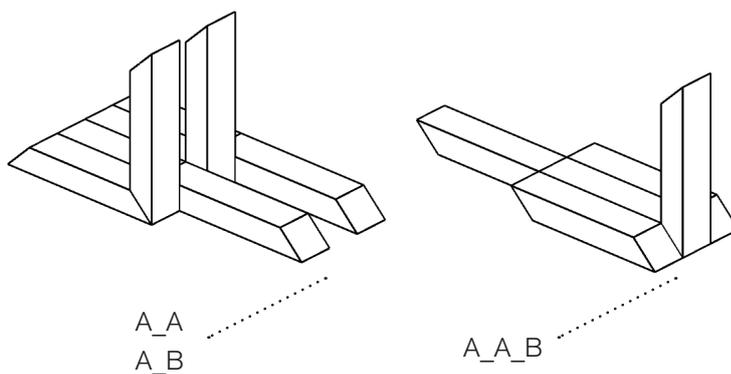
Si è tentato successivamente di mantenere la possibilità di uno sviluppo lineare e ortogonale, cercando allo stesso tempo una geometria che riuscisse a produrre delle superfici continue che non avessero una dimensione prevalente sull'altra:



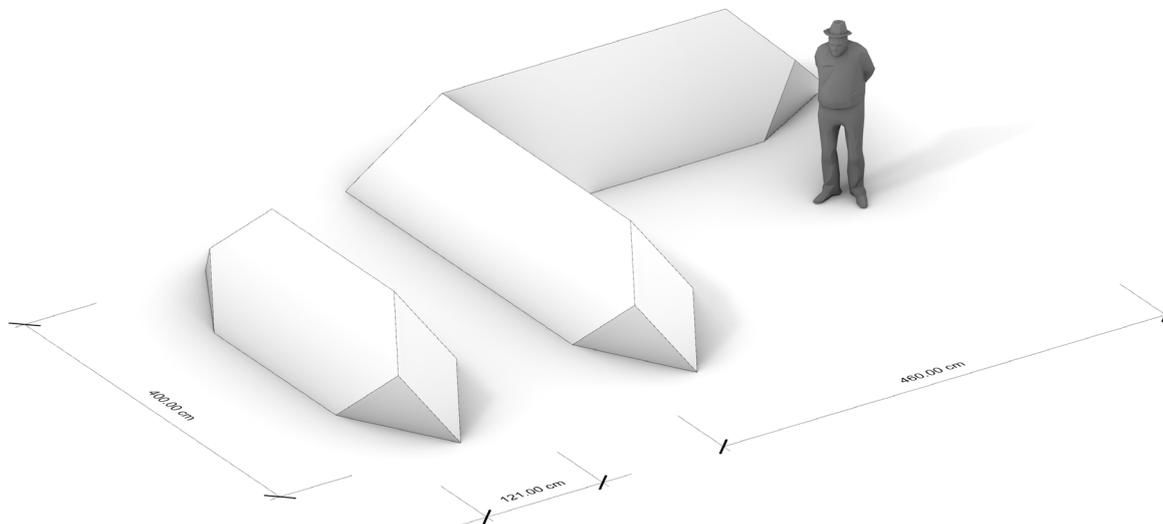
Seconda geometria ipotizzata



Studi di varie combinazioni

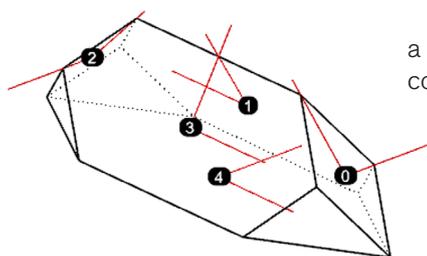


Vengono infine scelte le due geometrie rappresentate, una con sviluppo lineare e l'altra con sviluppo planare. La forma generica di per sé non connota a priori uno spazio e non ha quindi caratteristiche architettoniche singolarmente se non quelle di ostacolo nello spazio.

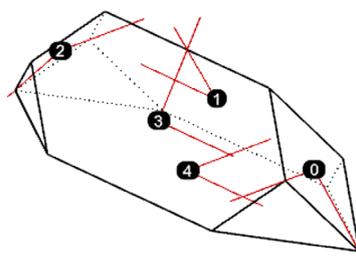


## Connessioni.

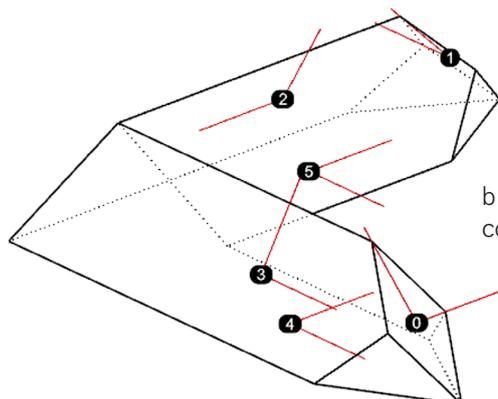
Le connessioni sviluppate si formano a partire da determinati punti sulla superficie del pezzo che vengono scelti a priori. La scelta dei punti è a discrezione del progettista, e si sceglie in questo caso di posizionare le connessioni che preservano le modalità combinatorie viste sopra.



a  
count 5



a Switch  
count 5



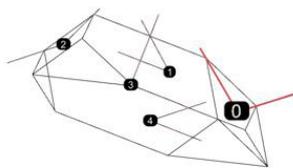
b  
count 6

## Fenotipi.

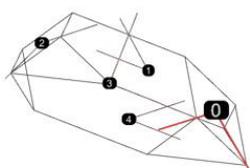
Il numero di connessioni prodotte dal pezzo viene separato in diverse categorie a seconda del comportamento che la specifica connessione mette in atto; all'interno del lavoro di tesi queste categorie verranno chiamate fenotipi. La creazione di fenotipi consente di creare delle regole locali ad hoc da fornire al processo all'atto di posa del nuovo pezzo, e in questo lavoro di tesi sono state scelte tre categorie:

- Linear – due pezzi connessi con sviluppo longilineo.
- Bulk – due pezzi connessi con sviluppo laterale.
- Ortho – due pezzi connessi con sviluppo perpendicolare.

Costruzione di una regola



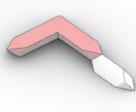
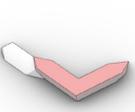
a Switch, handle 0



a Switch, handle 0

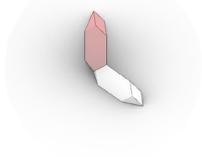
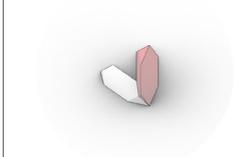
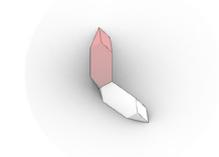
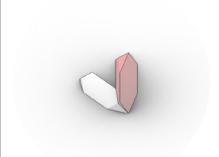
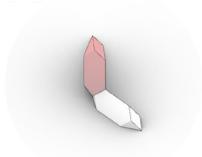
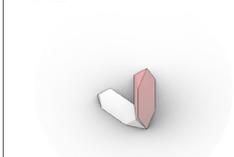
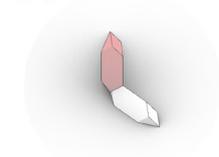
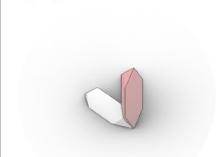
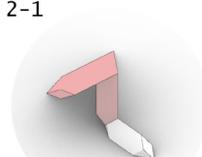
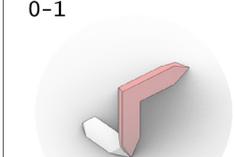
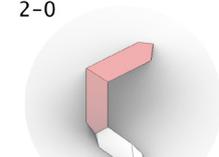
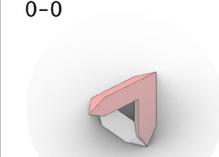
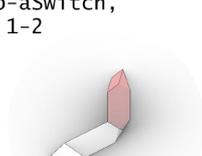
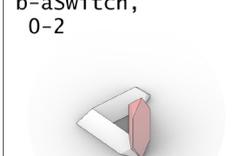
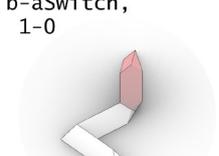
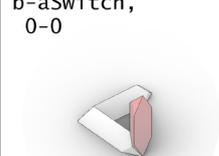


a-aSwitch\_0-0

a-a, 2-2 	a-a, 0-2 	a-a, 2-0 	a-a, 0-0 
a-b, 2-1 	a-b, 0-1 	a-b, 2-0 	a-b, 0-0 
aSwitch-aSwitch, 2-2 	aSwitch-aSwitch, 0-2 	aSwitch-aSwitch, 2-0 	aSwitch-aSwitch, 0-0 
b-a, 1-2 	b-a, 0-2 	b-a, 1-0 	b-a, 0-0 
b-b, 1-1 	b-b, 0-1 	b-b, 1-0 	b-b, 0-0 

a-a, 3-3 	a-a, 1-3 	a-a, 3-1 	a-a, 1-1 
a-aSwitch, 3-3 	a-aSwitch, 1-3 	a-aSwitch, 3-1 	a-aSwitch, 1-1 
a-b, 3-3 	a-b, 1-3 	a-b, 3-2 	a-b, 1-2 
aSwitch-a, 3-3 	aSwitch-a, 1-3 	aSwitch-a, 3-1 	aSwitch-a, 1-1 
aSwitch-aSwitch, 3-3 	aSwitch-aSwitch, 1-3 	aSwitch-aSwitch, 3-1 	aSwitch-aSwitch, 1-1 

aSwitch-b, 3-3 	aSwitch-b, 1-3 	aSwitch-b, 3-2 	aSwitch-b, 1-2 
b-a, 3-3 	b-a, 2-3 	b-a, 3-1 	b-a, 2-1 
b-aSwitch, 3-3 	b-aSwitch, 2-3 	b-aSwitch, 3-1 	b-aSwitch, 2-1 
b-b, 3-3 	b-b, 2-3 	b-b, 3-2 	b-b, 2-2 

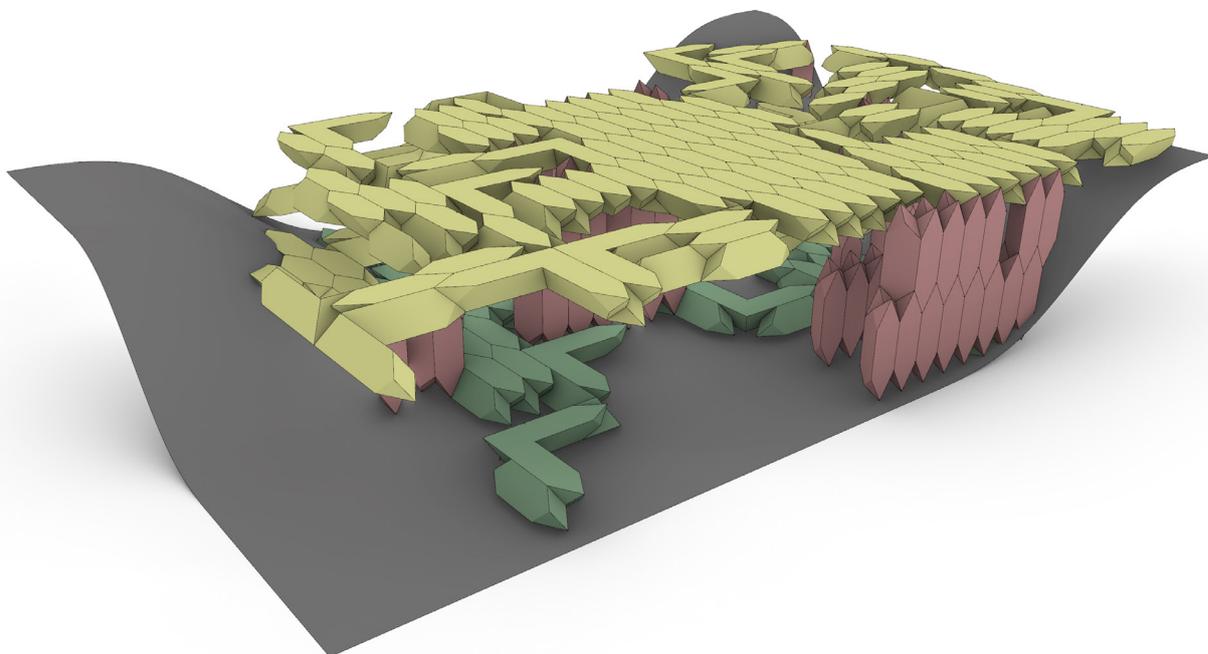
a-aSwitch, 2-2 	a-aSwitch, 0-2 	a-aSwitch, 2-0 	a-aSwitch, 0-0 
aSwitch-a, 2-2 	aSwitch-a, 0-2 	aSwitch-a, 2-0 	aSwitch-a, 0-0 
aSwitch-b, 2-1 	aSwitch-b, 0-1 	aSwitch-b, 2-0 	aSwitch-b, 0-0 
b-aSwitch, 1-2 	b-aSwitch, 0-2 	b-aSwitch, 1-0 	b-aSwitch, 0-0 

## Regole interne.

La scelta del tipo di pezzo e del fenotipo con cui questo verrà assemblato avviene grazie ad alcune regole interne che derivano dal pezzo al quale si sta tentando di accedere. Questo comportamento è in particolare dettato dalle espressioni, qui sotto definite.

### Espressioni.

Ad ogni pezzo depresso viene corrisposto un valore numerico tra che lo categorizza come orizzontale sul terreno, verticale, oppure orizzontale sopraelevato dal terreno. Questi valori costituiscono la base con cui l'assemblaggio può scegliere il tipo di pezzo da assemblare e il linguaggio da utilizzare.



- Ground level
- Vertical
- Horizontal

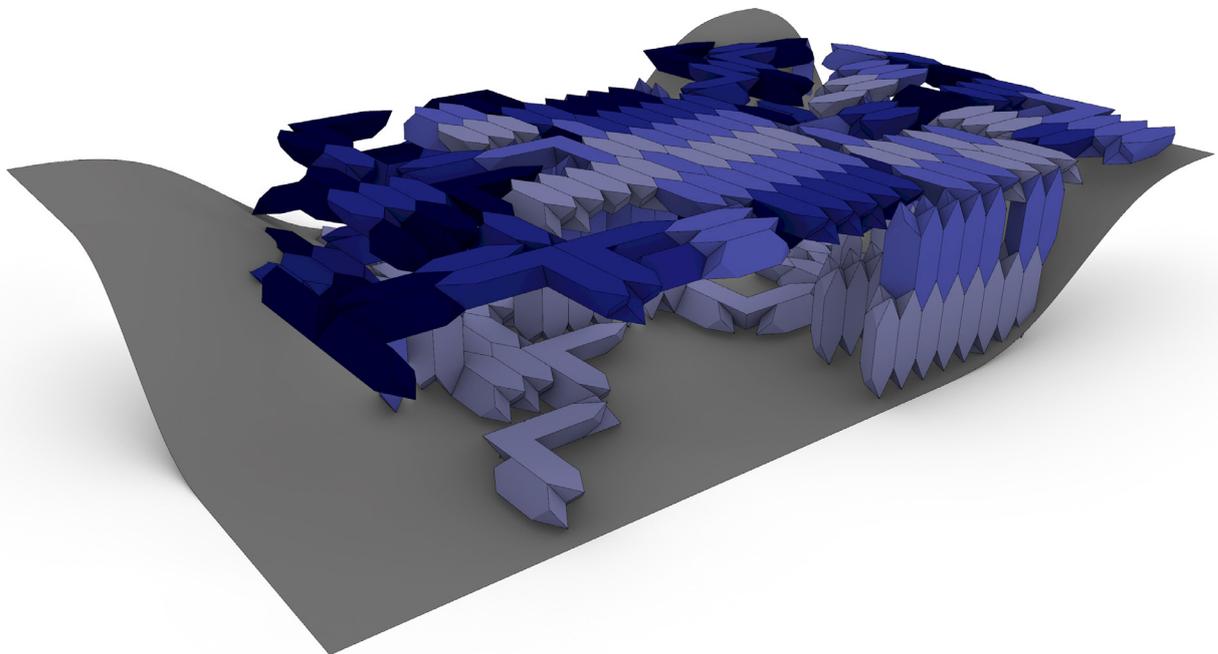
Espressioni secondarie.

Si utilizza anche un secondo valore che tiene conto dell'ordine in cui un pezzo viene inserito. Questo valore assume un significato diverso per ogni tipologia di espressione dista in precedenza:

- Ground Level: i colori denotano le fasi in cui il pezzo è stato deposto, dal più chiaro per l'assemblaggio principale, ai più scuri per i procedimenti di *Fill* e *Radicate* attuati in post.

- Vertical: i colori denotano l'elevazione del pezzo categorizzato come vertical.

- Horizontal: Sulla copertura viene evidenziata attraverso il colore la lontananza dal pezzo vertical a cui sono state attaccate. Colori chiari denotano una relazione di vicinato con il pezzo vertical mentre colori scuri mostrano un passaggio per altri pezzi horizontal.



## Parametri Esterni.

Vengono introdotti alcuni parametri numerici capaci di influenzare il tipo di fenotipo utilizzato dall'assemblaggio. In particolare, viene modificata la probabilità di utilizzo di un dato fenotipo rispetto ad altri sulla base del flavour del pezzo al quale ci si sta collegando.

## Test.

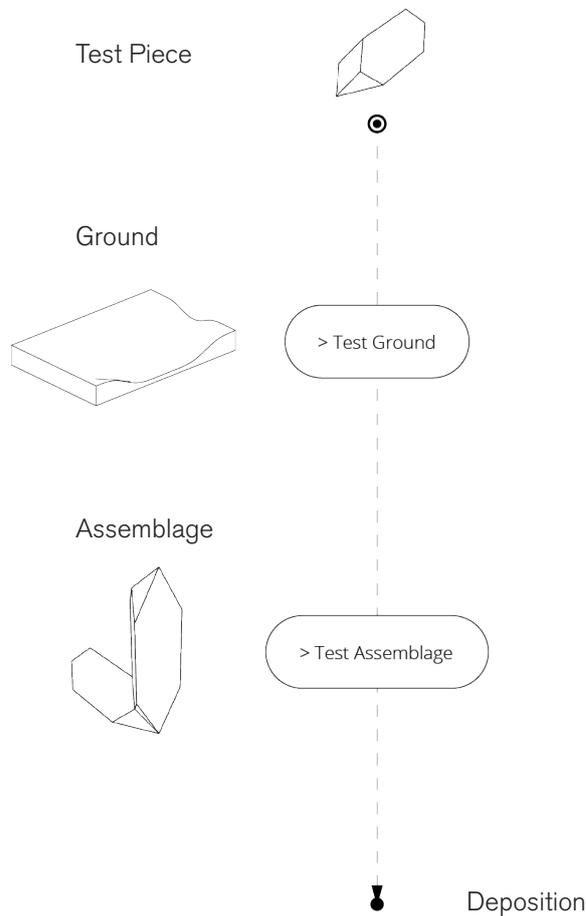
Nel momento in cui il pezzo viene deposto si innescano dei procedimenti di test, per verificarne la coerenza.

### Test Ambiente.

Viene dapprima verificata la non compenetrazione con l'ambiente, ovvero che non ci sia intersezione tra il pezzo deposto e gli oggetti dati al processo come ambiente.

### Test Assemblage.

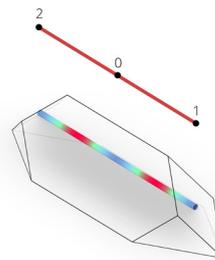
Successivamente viene rapportato all'esistente assemblaggio assicurandosi che il pezzo deposto ricada interamente all'esterno di tutti i pezzi che già compongono l'insieme.



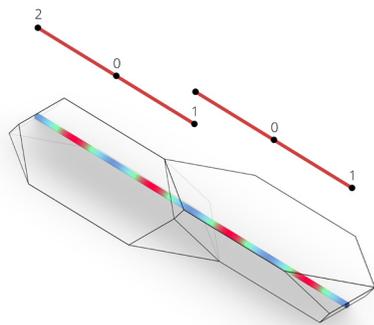
## Modello Strutturale.

Nel momento in cui i test abbiano avuto esito positivo viene costruito il modello con l'estensione Millipede: a ogni pezzo viene quindi assegnata un'asta collegata alla successiva con dei nodi creati per ogni iterazione sulla base della geometria assegnata.

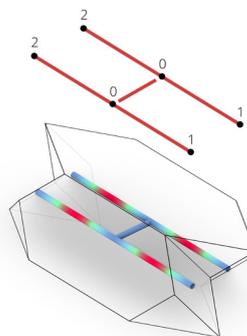
Single Piece



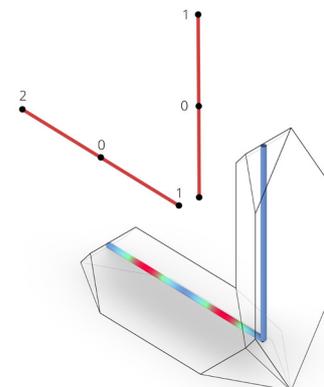
Linear



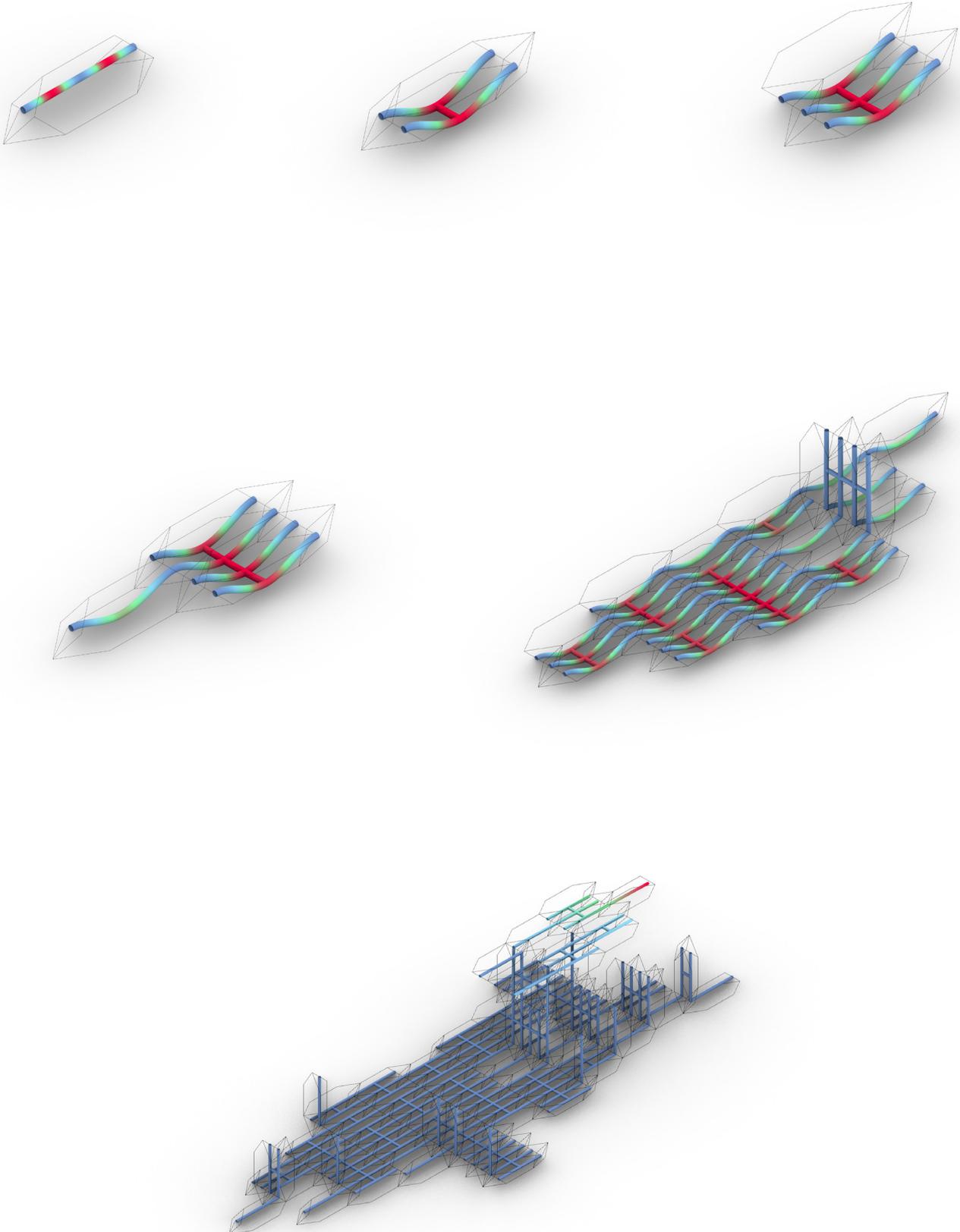
Bulk



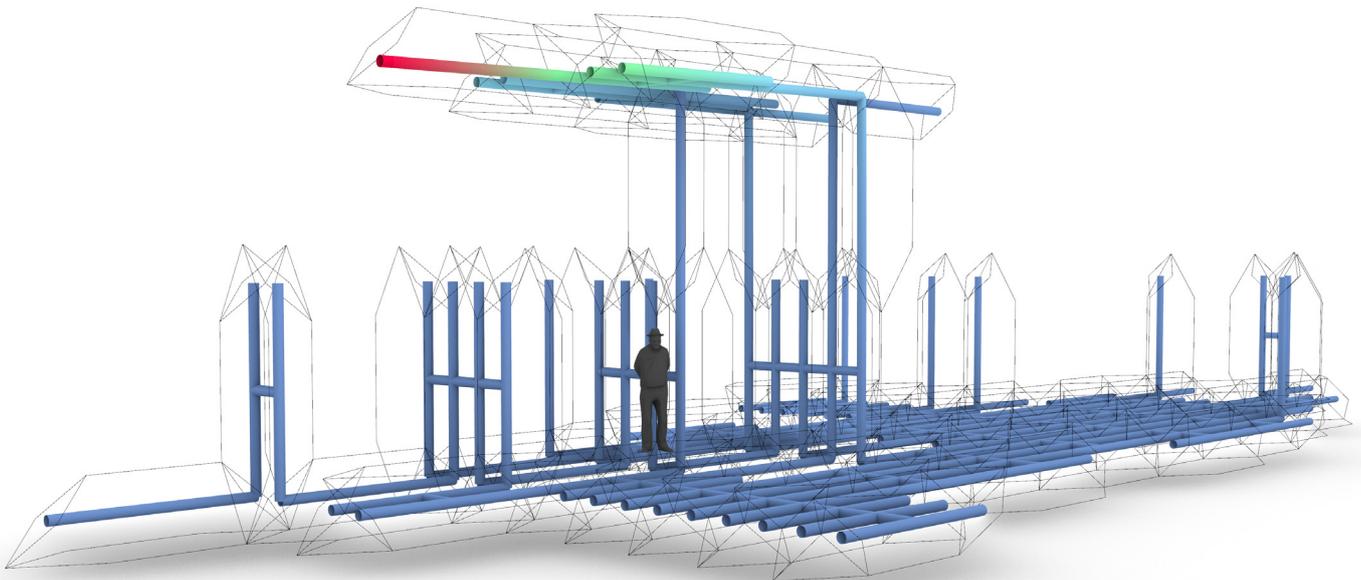
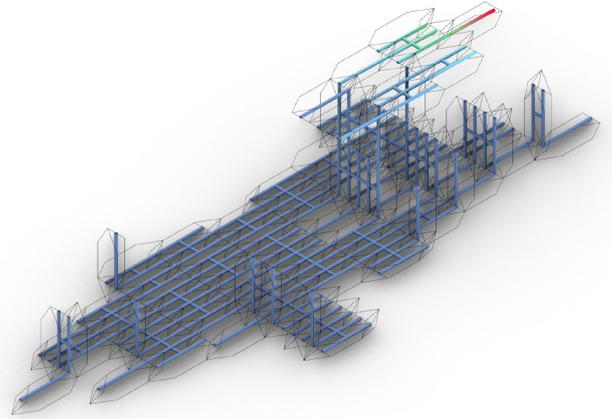
Ortho



Una volta aggiornato il modello strutturale, si è in grado di valutare il sistema creato e di calcolarne il valore di deflection massimo, risalendo al pezzo dove questo si è verificato.



Al sistema strutturale viene imposto che le parti a contatto con il terreno siano vincolate in tutte le direzioni; non stupisce quindi trovare la deformazione massima sempre posizionata negli sporti che vengono a crearsi.

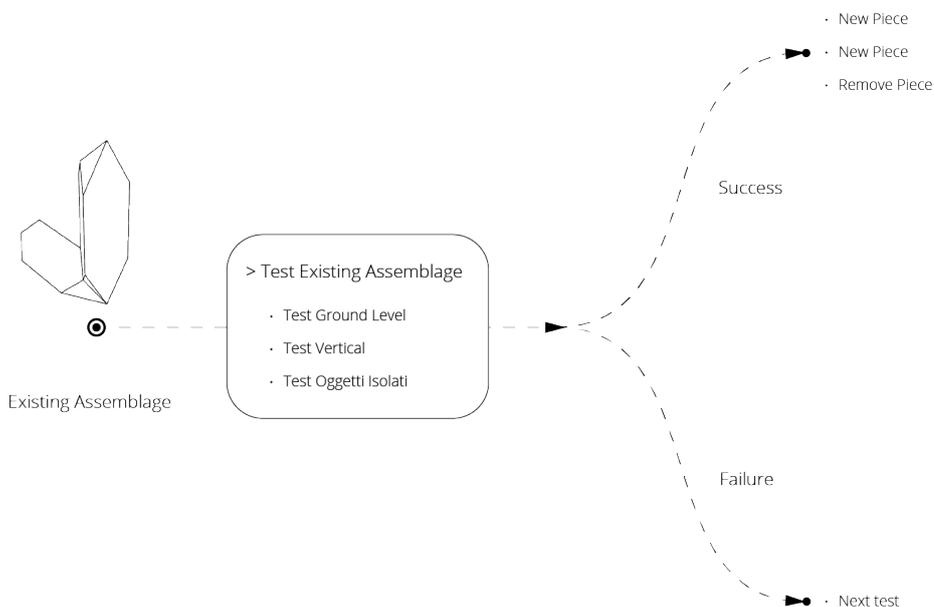




## 2.4 Post-produzione

Al termine del processo vengono inseriti due ulteriori componenti che modificano l'assemblaggio costituito, in base alle informazioni che sono state archiviate dallo stesso.

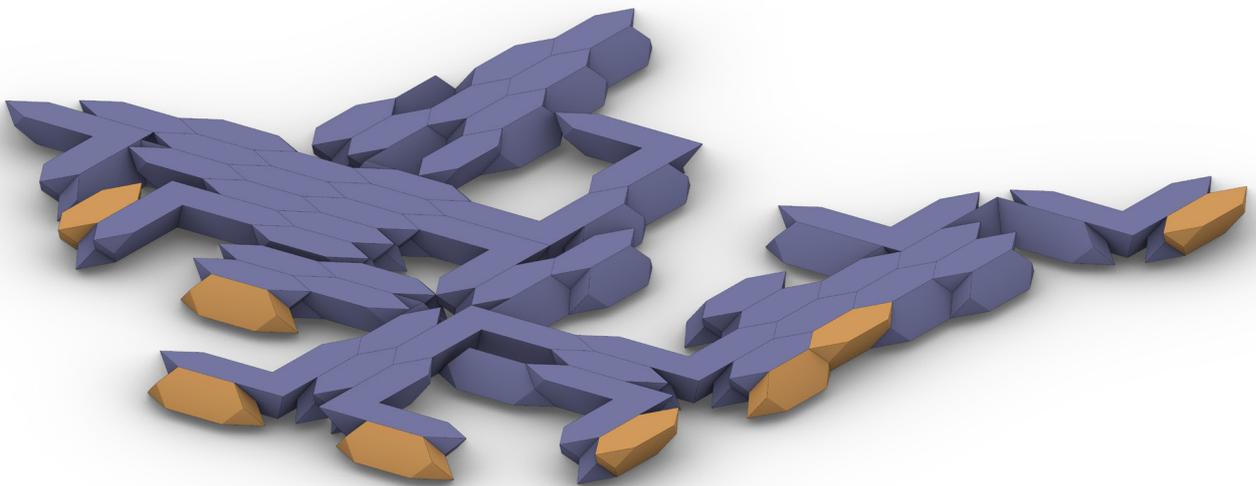
Si adotta questa procedura per limare le caratteristiche dell'assemblaggio meno compatibili dal punto di vista architettonico, cercando di non inserire criteri che stravolgano la coerenza delle proprietà emergenti che sono venute a formarsi.



Processo illustrato

## Fill.

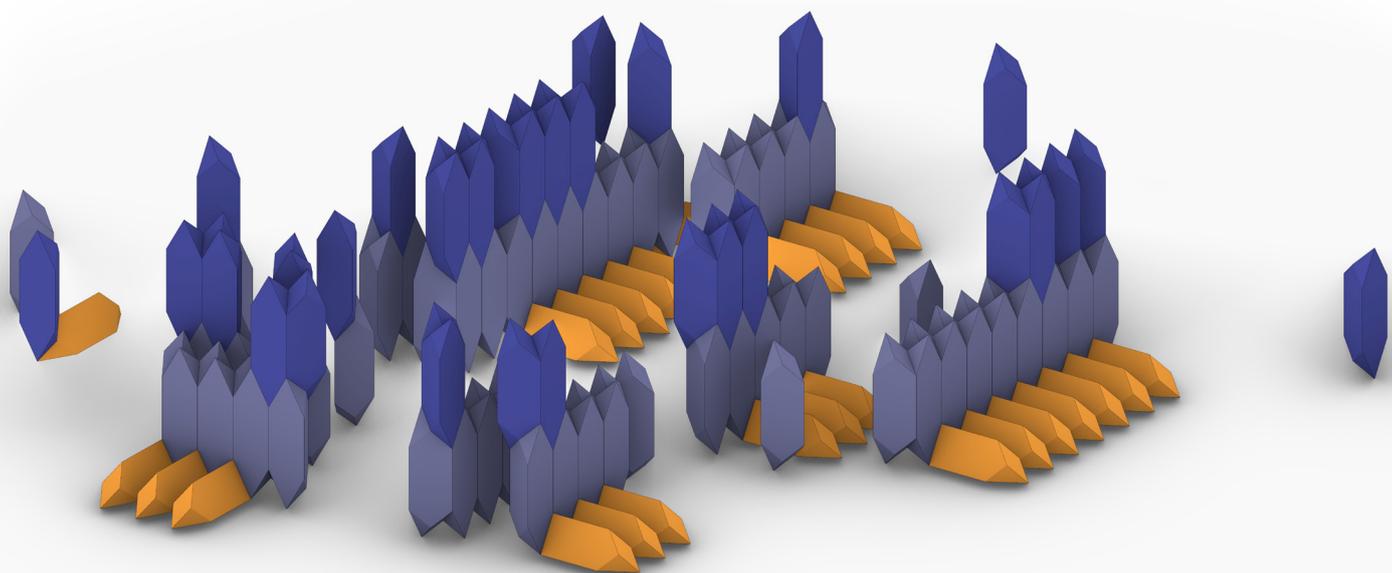
Nel complesso ricorre il verificarsi della condizione per cui i pezzi che costituiscono la parte calpestabile non formino una superficie continua ma presentino invece varie aperture. Sebbene questo sia un effetto che deriva dal comportamento emergente del sistema, è auspicabile intervenire cercando di mantenere la proprietà generale inserendo però localmente dei pezzi per evitare le discontinuità dove queste rischiano di compromettere uno sviluppo percorribile della superficie. Si inserisce quindi un procedimento che valuta la possibilità di inserire dei pezzi nel momento essi non intersechino l'assemblaggio già costituito, di fatto andando a riempire le lacune lasciate.



Vengono evidenziati in giallo i pezzi inseriti.

## **Radicate.**

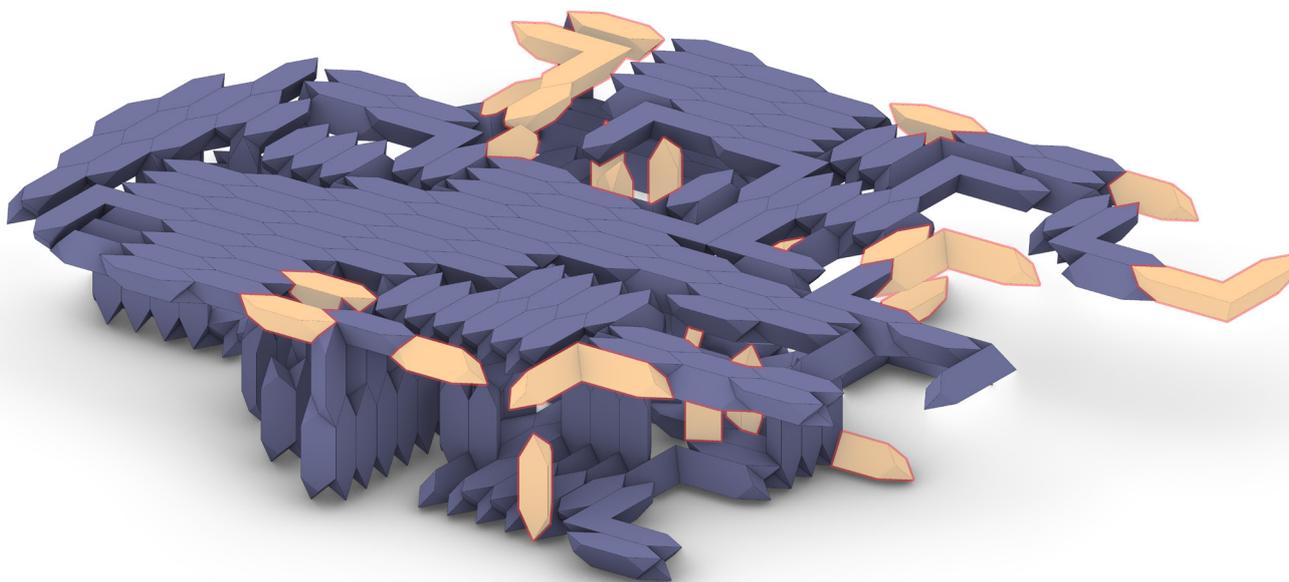
Segue un processo simile teso a radicare gli elementi verticali sprovvisti di un elemento orizzontale alla base. Per ognuno di questi, compatibilmente con la propria posizione all'interno dell'insieme viene posizionato un pezzo, al quale sono assegnate le condizioni di vincolo di un pezzo a contatto con il terreno.



Vengono evidenziati in giallo i pezzi inseriti.

## Remove.

In maniera analoga, alcuni pezzi presenti nell'assemblaggio formano delle appendici non percorribili, e che non mettono in comunicazione parti dell'assemblaggio, bensì fungono da termine. Si inserisce un procedimento che valuta questi pezzi e li rimuove nel caso in cui risultino un'appendice isolata nel complesso.



Vengono evidenziati in giallo i pezzi rimossi.

## 2.5 Valutazione

Avendo presentato le tipologie di parametri presenti all'interno del processo, si valutano le qualità finali che vengono a prodursi, variando contestualmente gli input forniti al sistema.

La variazione degli input interni ed esterni serve a considerare le capacità del sistema e a guidarlo verso determinati obiettivi progettuali. Si confrontano i risultati dei vari test in forma di benchmark, per comprendere quale combinazione di parametri generi delle condizioni tettoniche che siano più interessanti dal punto di vista architettonico.

Vengono presi in considerazione parametri esterni e interni: i primi rappresentano dei vincoli esterni per il procedere del sistema, mentre i secondi vanno a incidere sulle strategie che lo stesso mette in atto nel suo procedere.

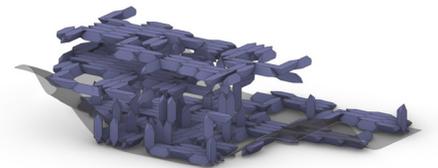
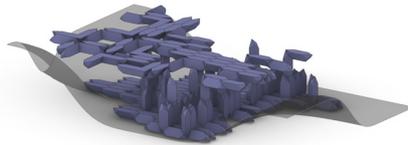
## Variazione parametri esterni.

Viene valutato l'output a seconda di diversi ambienti con cui relazionarsi. In particolare, questi ambienti presentano ostacoli diversificati per testare le capacità del sistema. Si propongono due prove differenziate dal numero totale di pezzi assemblati.

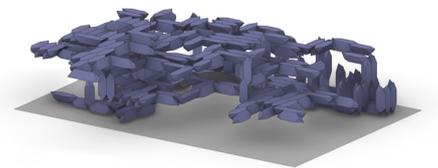
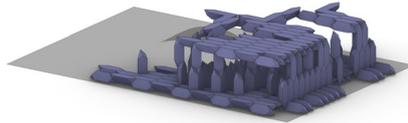
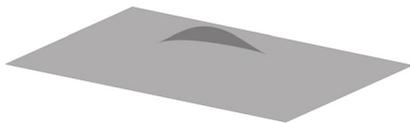
*Ground*

*A. 300 pieces*

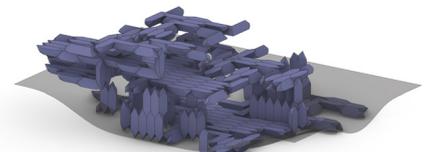
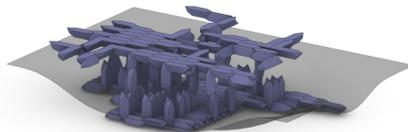
*B. 500 pieces*



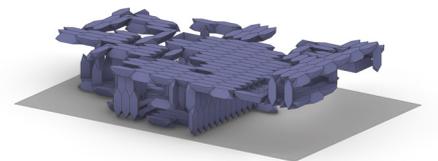
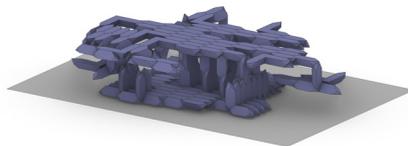
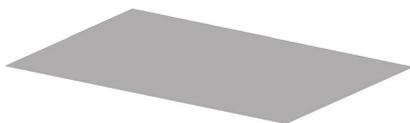
*Irregular*



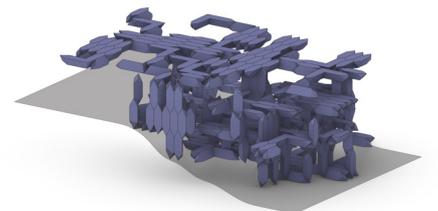
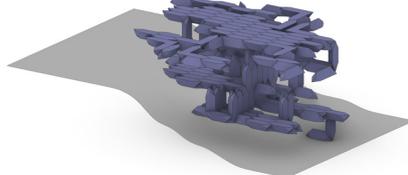
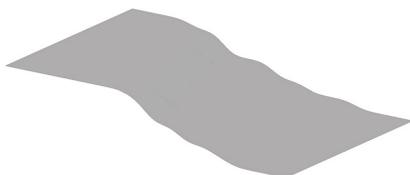
*Mountain*



*Valley*



*Plane*

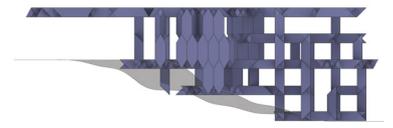
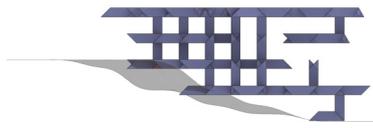
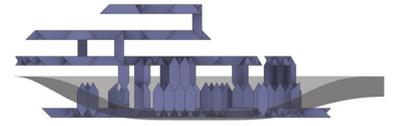
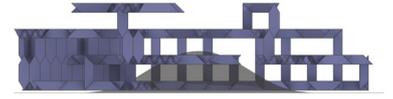
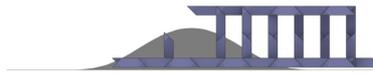
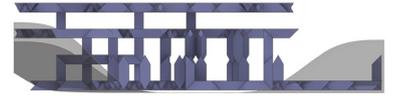


*Slope*

*Ground*

*A. 300 pieces*

*B. 500 pieces*



## Variazione parametri interni.

Si valutano le qualità architettoniche che vengono a formarsi variando i rapporti probabilistici di utilizzo dei vari linguaggi dell'assemblaggio.

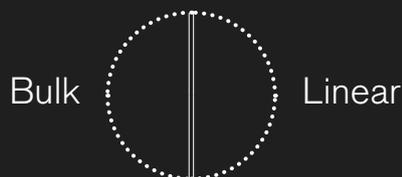
### Variazione parametro *flat*:

due valori compresi tra 0 e 1 decidono la probabilità che, se il receiver è un pezzo con espressione *Ground Level*, il fenotipo utilizzato successivamente sia lineare ortogonale o massivo.



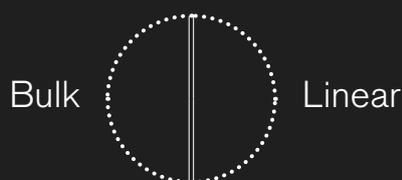
### Variazione parametro *roof*:

un valore compreso tra 0 e 1 decide la probabilità che, se il receiver è un pezzo con espressione *Horizontal*, il linguaggio utilizzato successivamente sia lineare lineare o massivo.



### Variazione parametro *vertical*:

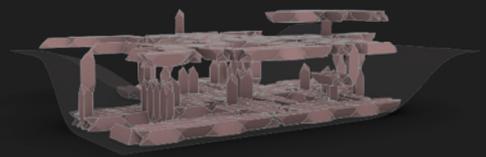
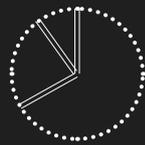
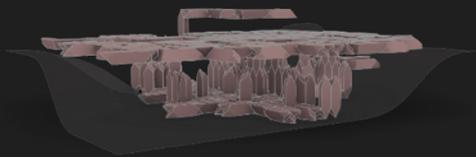
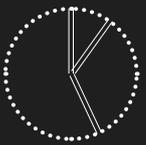
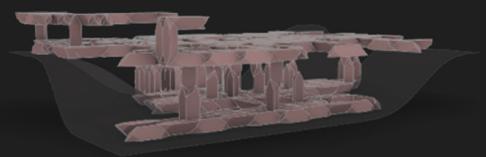
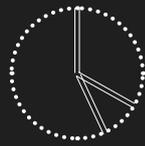
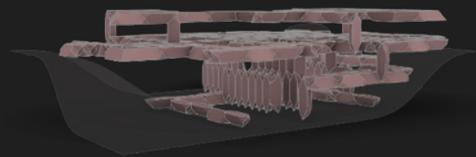
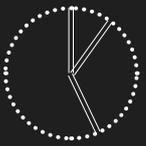
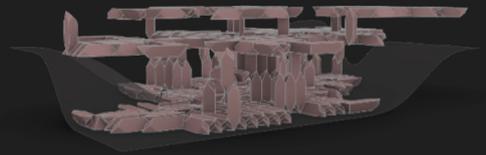
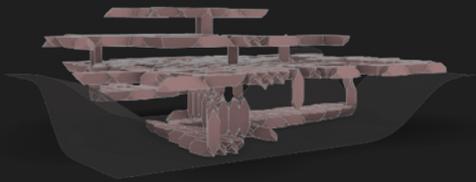
un valore compreso tra 0 e 1 decide la probabilità che, se il receiver è un pezzo con espressione *Vertical*, il linguaggio utilizzato successivamente sia lineare lineare o massivo.



Variazione *flat*

input *roof* = 0.5

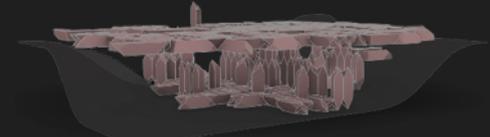
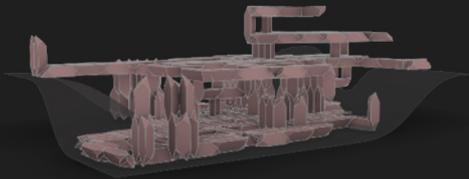
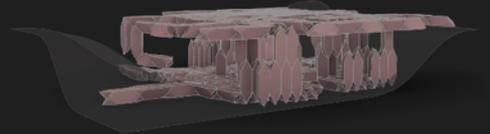
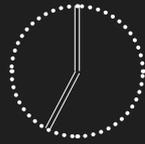
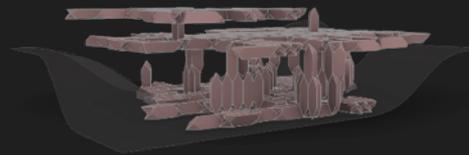
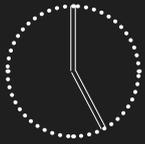
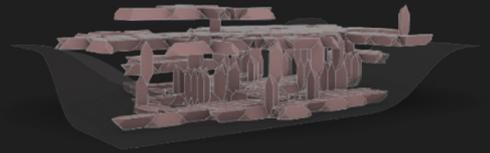
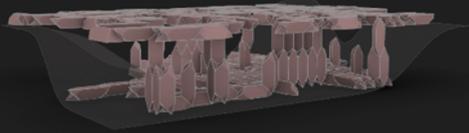
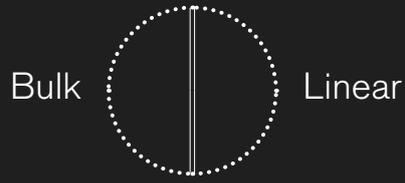
input *vertical* = 0.5



# Variazione roof

input flat = 0.33 - 0.66

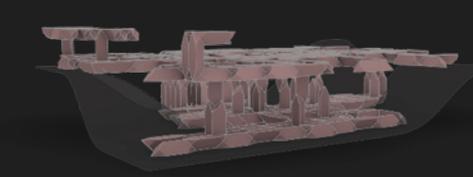
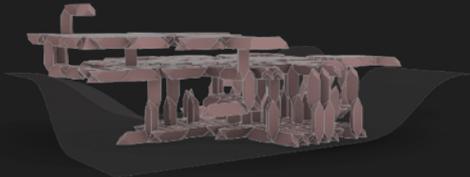
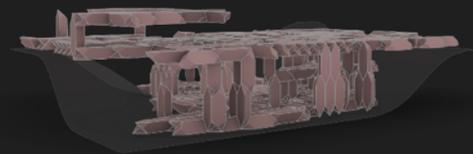
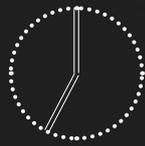
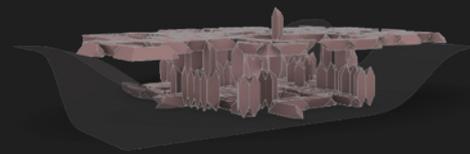
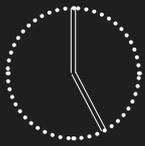
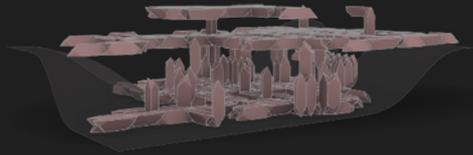
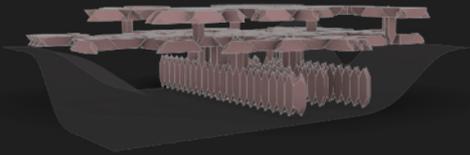
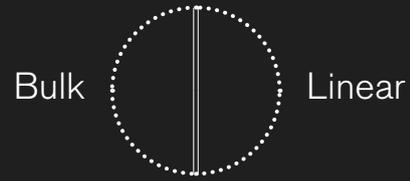
input vertical = 0.5

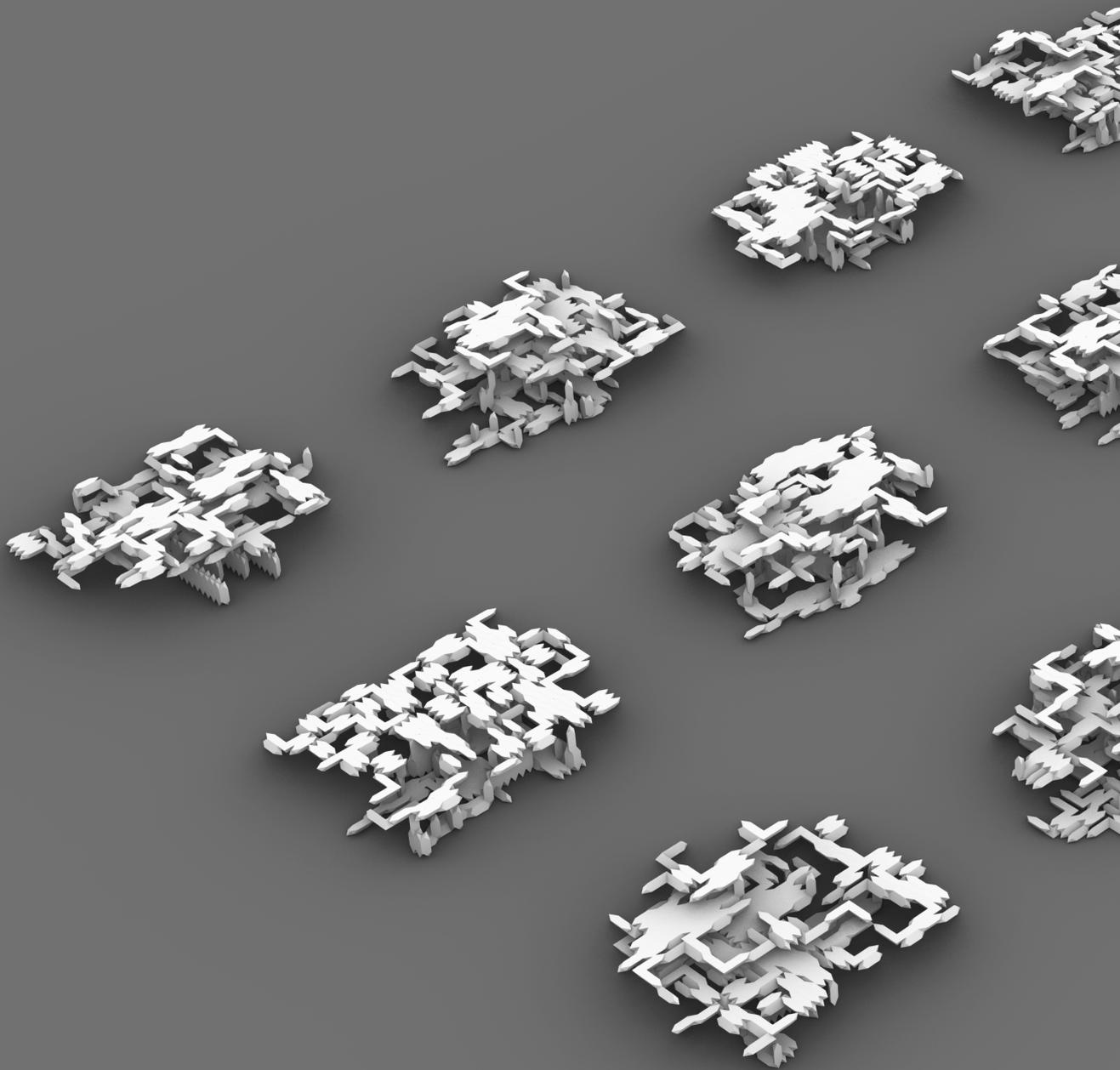


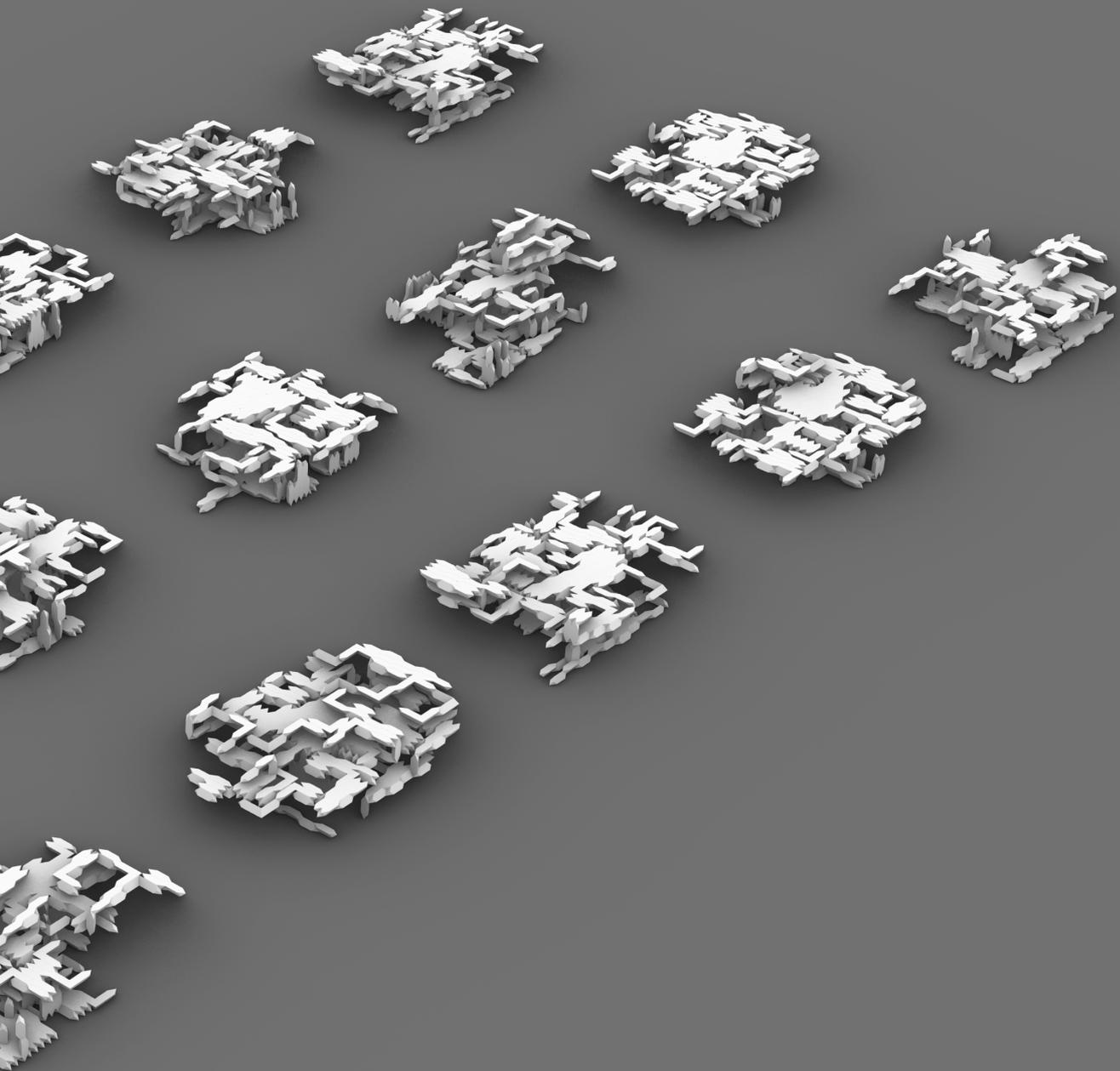
Variazione vertical

input flat = 0.33 - 0.66

input roof = 0.5









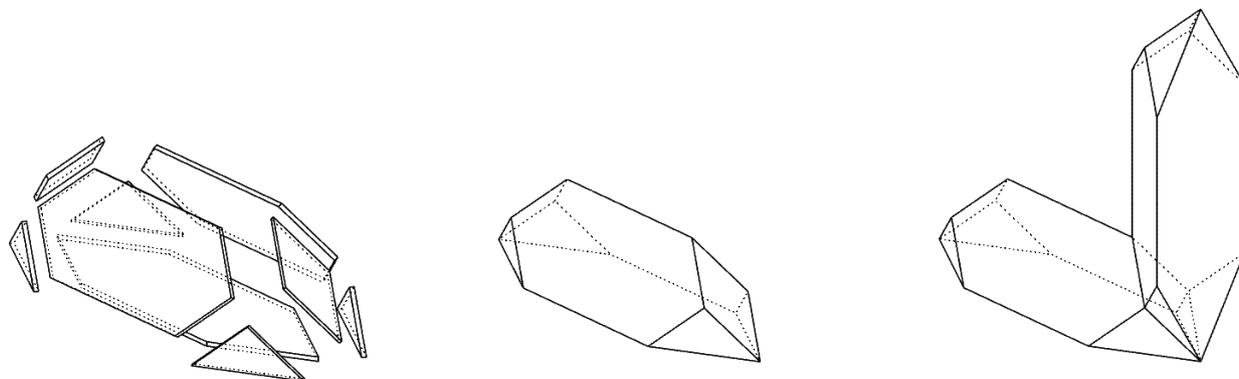
The Smile, London 2016.  
Alison Brooks Architects

## 3. Materiale

### 3.1 Premessa

Studiare un sistema costruttivo architettonico significa implicitamente progettare la realizzazione e immaginare le varie fasi con cui questo potrà essere costruito.

Nel caso in esame questa riflessione si dimensiona sulla struttura delle singole parti, il loro montaggio e le connessioni che intervengono tra ogni pezzo.



Si tenta quindi di dare forma all'idea di sistema almeno almeno a livello iniziale, arrivando all'ipotesi di materiale utilizzato e montaggio del sistema.



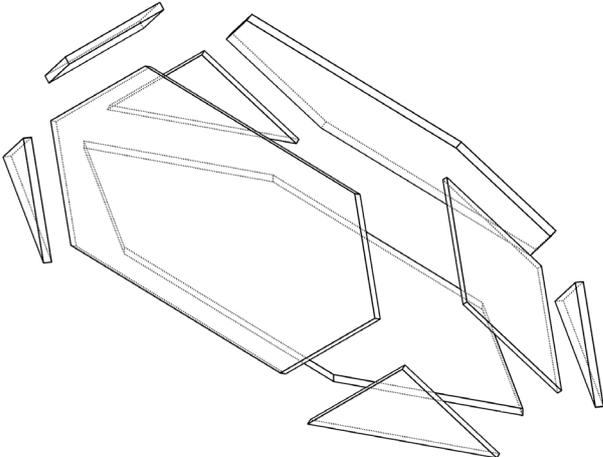
## 3.2 Cross Laminated Timber

Formulando un'ipotesi di realizzazione del sistema si prende in considerazione il Cross Laminated Timber, un prodotto in legno ingegnerizzato simile a una piastra, ottimizzato per sopportare carichi dentro e fuori l'aereo. Il CLT è composto da un numero dispari di strati (in generale tre, cinque, sette o anche di più), ciascuna delle tavole (o travi) affiancate, che sono disposti trasversalmente l'uno all'altro con un angolo di 90° e quasi rigidamente collegati da incollaggio adesivo. L'incollaggio è solitamente realizzato con resina melamminica, una resina sintetica termoindurente incolore e resistente all'acqua.

Il materiale scelto consente la possibilità di essere tagliato e assemblato successivamente. Si prevede quindi il taglio dimensionato dei pezzi per realizzare le geometrie ideate in precedenza.

Piece A:

Areatot: 11.60 m<sup>2</sup>



x2  
 Area: 2.93 m<sup>2</sup>  
 Areatot: 5.86 m<sup>2</sup>



295.00 cm

x2  
 Area: 0.44 m<sup>2</sup>  
 Areatot: 0.88 m<sup>2</sup>



148.00 cm

52.00 cm

x4  
 Area: 0.32 m<sup>2</sup>  
 Areatot: 1.28 m<sup>2</sup>



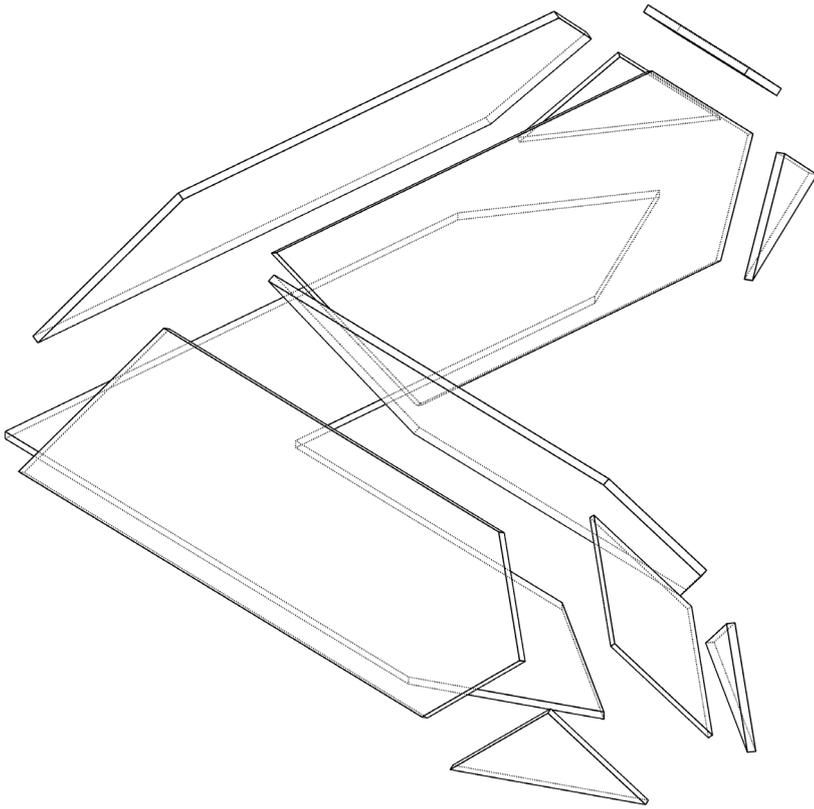
x1  
 Areatot: 3.57 m<sup>2</sup>



400.00 cm

Piece B:

Areatot: 26.10 m<sup>2</sup>



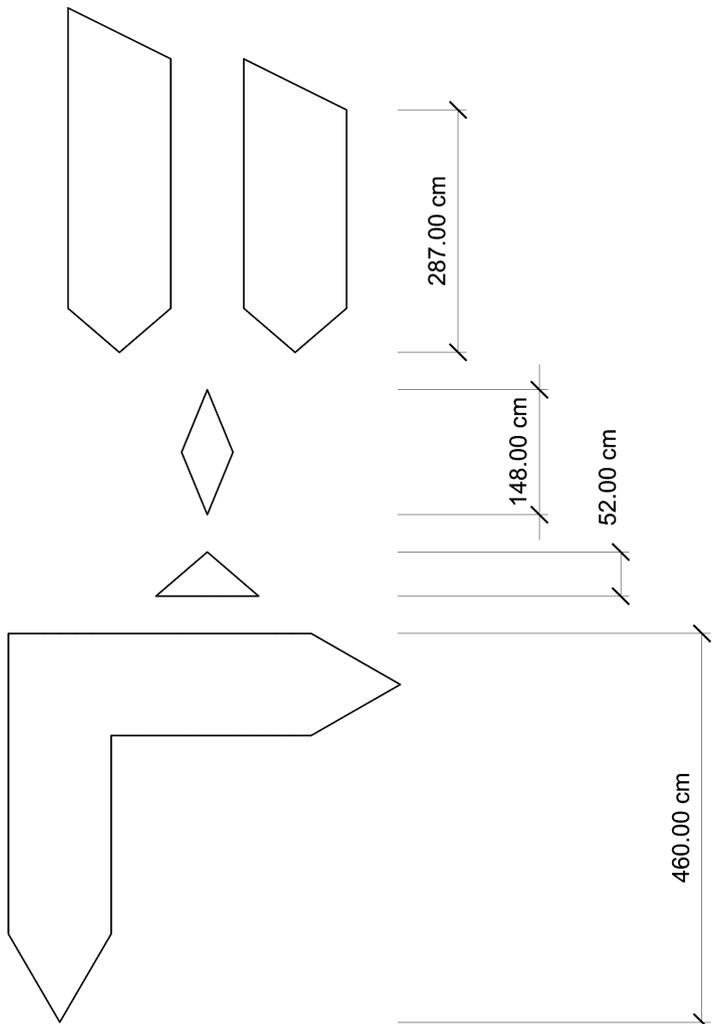
x2  
Area: 4.25 m<sup>2</sup>  
Areatot: 8.50 m<sup>2</sup>

x2  
Area: 3.52 m<sup>2</sup>  
Areatot: 7.04 m<sup>2</sup>

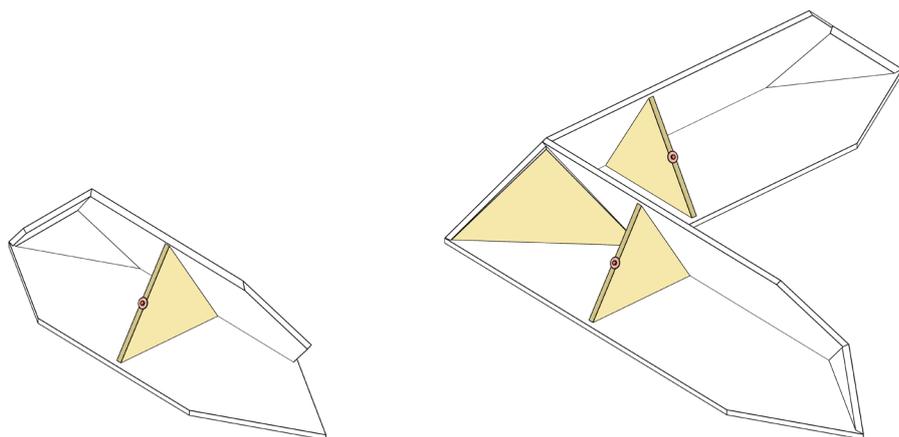
x2  
Area: 0.44 m<sup>2</sup>  
Areatot: 0.88 m<sup>2</sup>

x4  
Area: 0.32 m<sup>2</sup>  
Areatot: 1.28 m<sup>2</sup>

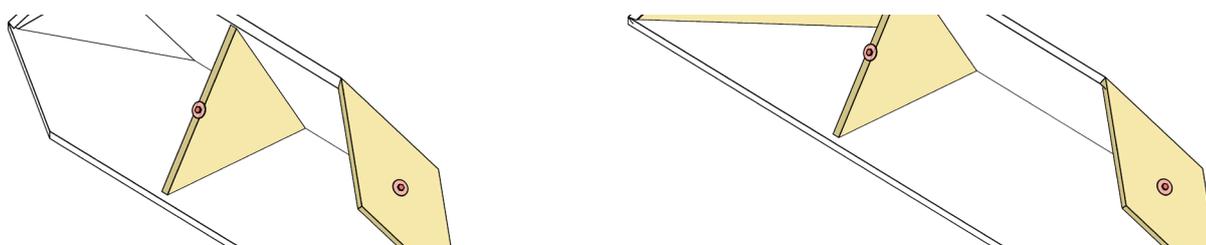
x1  
Areatot: 8.40 m<sup>2</sup>



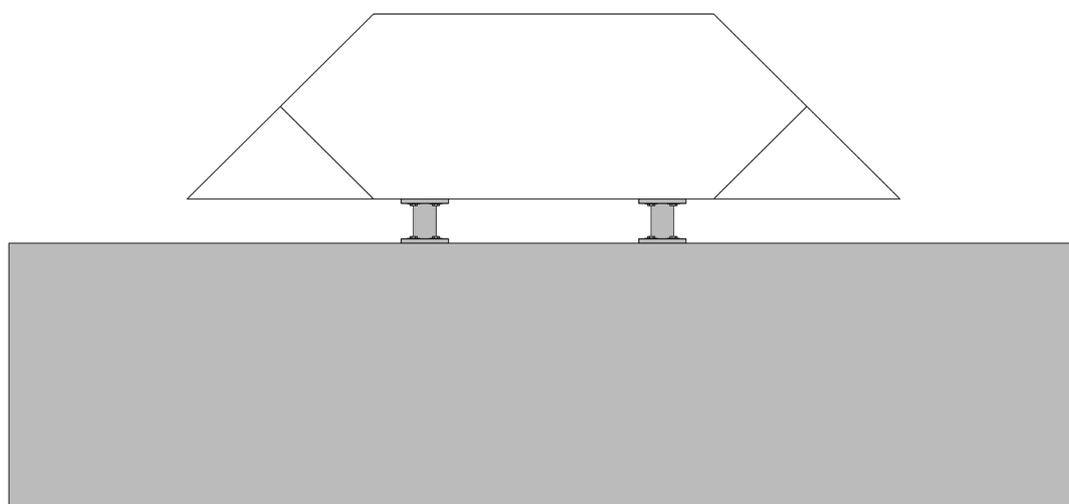
Il pezzo sono dotati all'interno di sezioni di rinforzo lungo lo sviluppo longitudinale al fine di irrobustire tutto il pezzo.



Le connessioni tra pezzo e pezzo vengono realizzate nelle stesse posizioni dei rinforzi



Si ipotizza per l'attacco a terra la realizzazione di alcuni plinti di fondazione ai quali collegare dei pezzi al ground level tramite delle piastre metalliche, al fine di garantire le condizioni di vincolo considerate nella formulazione del modello strutturale.

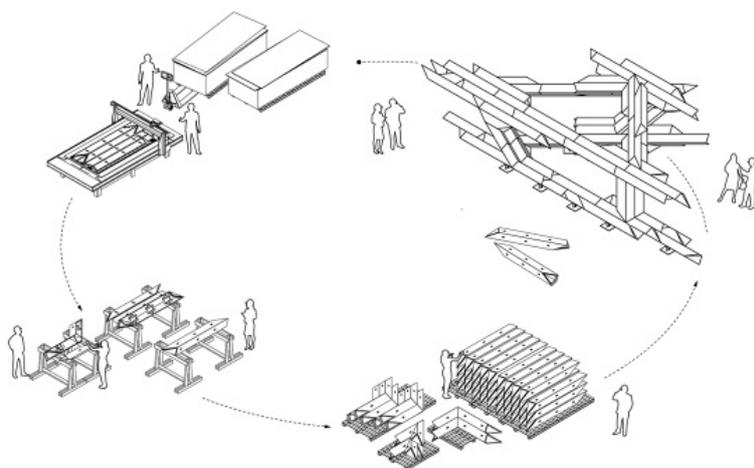


Nel proporre questo tipo di tecnologia non si può non citare il lavoro congiunto di Manja Van De Worp e Gill Retsin; un esempio di utilizzo analogo è quello del padiglione costruito per la biennale di Tallinn del 2017.

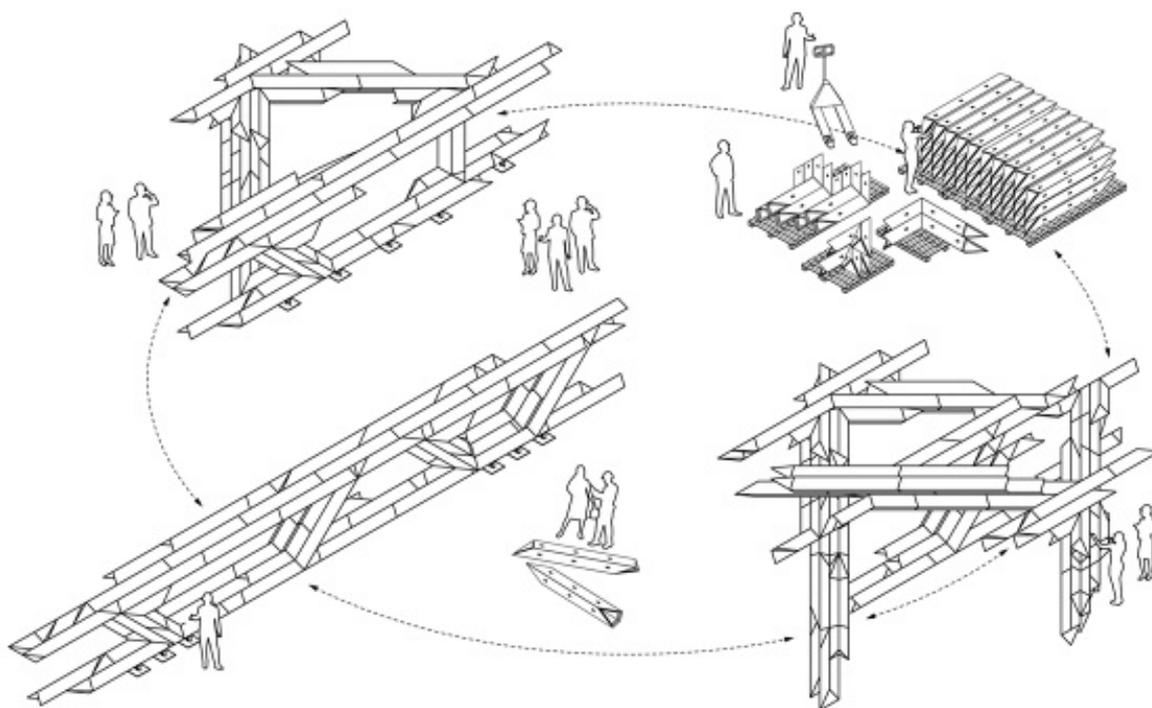
la struttura realizzata contava ottanta parti costruttive che sono state prodotte *in loco*, dal taglio del compensato con macchina a controllo numerico computerizzato all'assemblaggio delle singole parti fino all'insieme.



Nell'idea dei progettisti di questa esposizione non c'era solamente la tettonica del costruito, ma anche un'idea di processo costruttivo: le parti del padiglione infatti era state costruite *in loco*, sottendendo l'idea che un oggetto del genere potesse essere realizzato in qualsiasi parte del mondo, condividendo il progetto che vede parti generiche facilmente realizzabili in contesti differenti.



Tutto il padiglione inoltre poteva essere smontato e rimodellando il progetto riconfigurato in un'altra disposizione per un diverso utilizzo, rendendo il progetto non solo un'esplorazione architettonica ma una vera e propria riflessione sul processo di costruzione



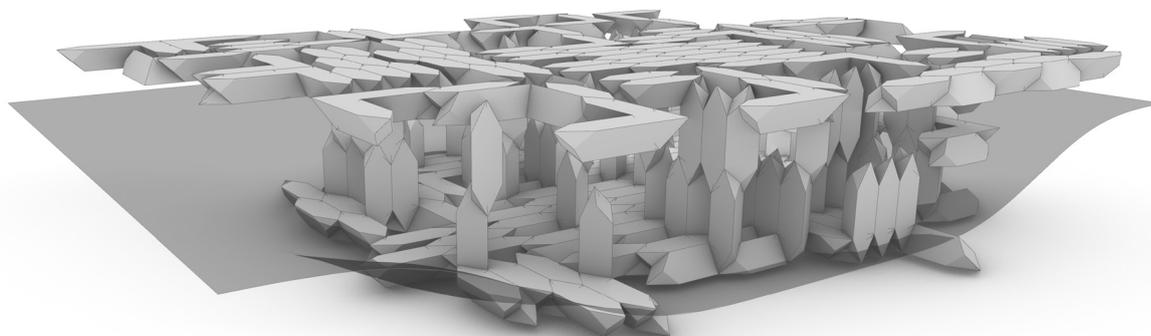




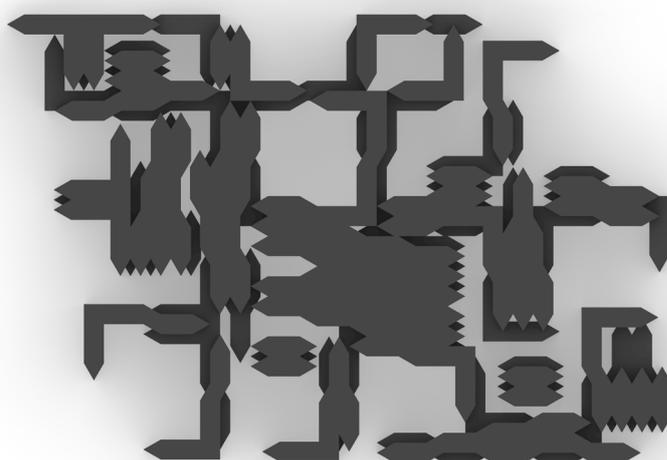
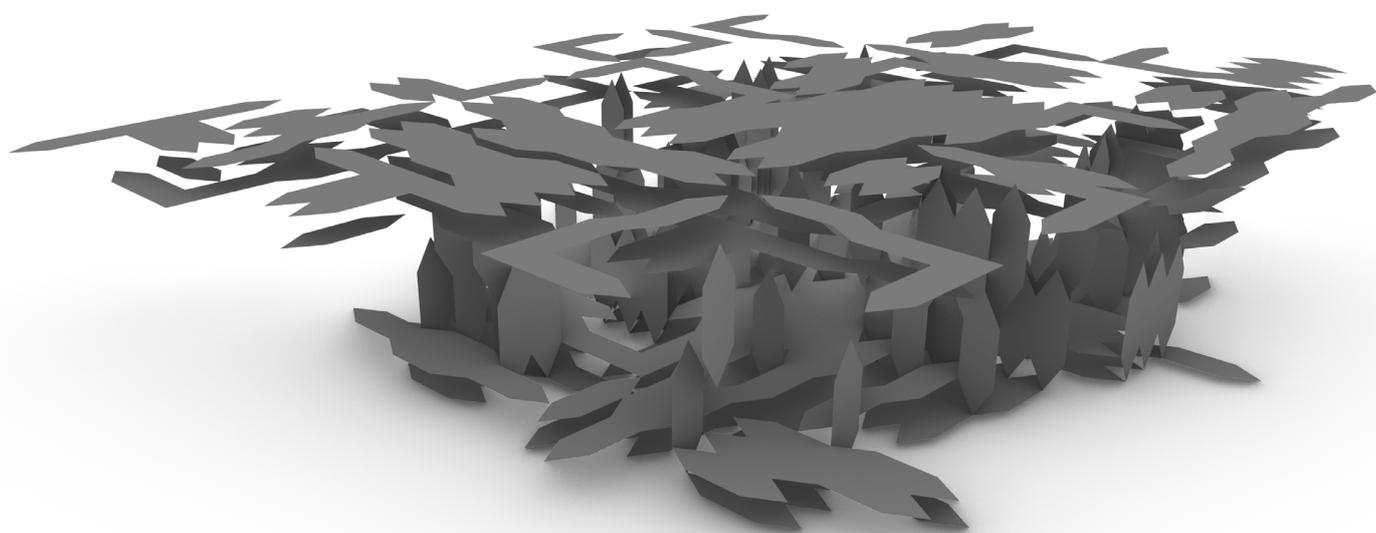
## 4. Applicazioni Architettoniche

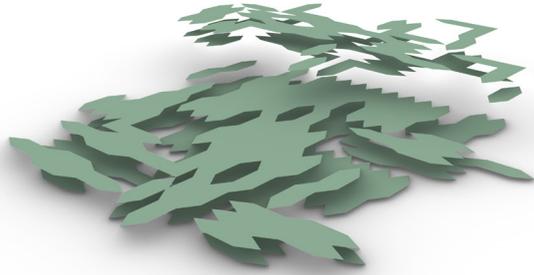
### 4.1 Utilizzo

La parte di classificazione architettonica è mirata all'isolamento di casi più architettonicamente compatibili e al riconoscimento e all'analisi di proprietà emergenti del sistema; si valuta perciò come l'utilizzo di una strategia come quella dell'assemblaggio possa variare la proposta architettonica, lavorando con un sistema che non funziona utilizzando un catalogo di parti suddivise per funzione, ma una parte generica che nell'intero assume un valore non riconducibile alla parte singola.



Un'analisi delle superfici mette in mostra un costruito permeabile, con una copertura discontinua variamente forata, un livello di pavimento relativamente costante sul quale è possibile riconoscere spazi di diverse grandezze e percorsi. Gli elementi verticali sono anch'essi variegati e si dispongono in maniera isolata a formare una configurazione da "pilastro" oppure in maniera continua più similmente a una cortina muraria. In seguito si riportano alcune misure registrate nell'analisi del modello architettonico.



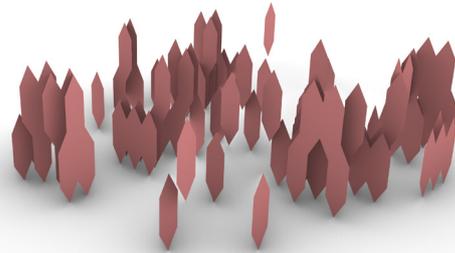


pieces: 213  
ground level: 51+162

area: 842.0 m<sup>2</sup>  
area a terra: 519.0 m<sup>2</sup>  
areamin: 7.1 m<sup>2</sup>  
areamax: 198.7 m<sup>2</sup>

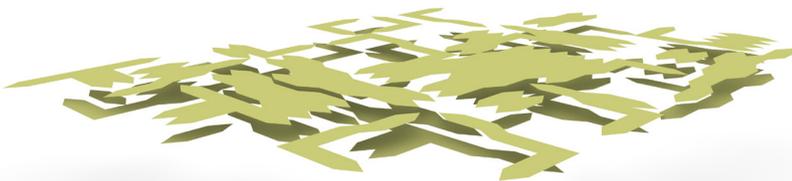
pieces: 102

altezza: 6.9 m<sup>2</sup>  
area: 363.0 m<sup>2</sup>  
areamin: 3.50 m<sup>2</sup>  
areamax: 21.4 m<sup>2</sup>

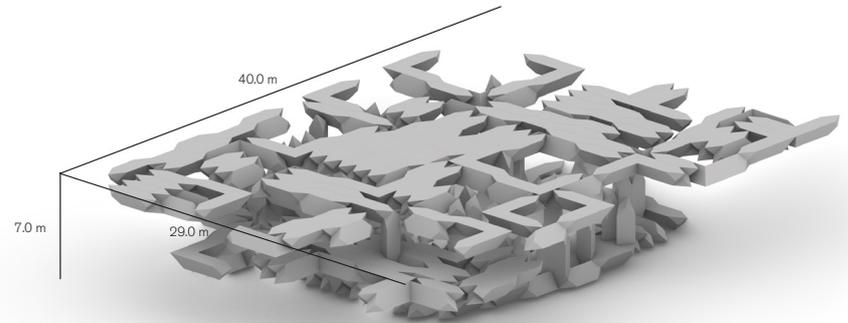


pieces: 167

area: 755 m<sup>2</sup>  
area a terra: 535 m<sup>2</sup>  
areamin: 7.1 m<sup>2</sup>  
areamax: 144.2 m<sup>2</sup>

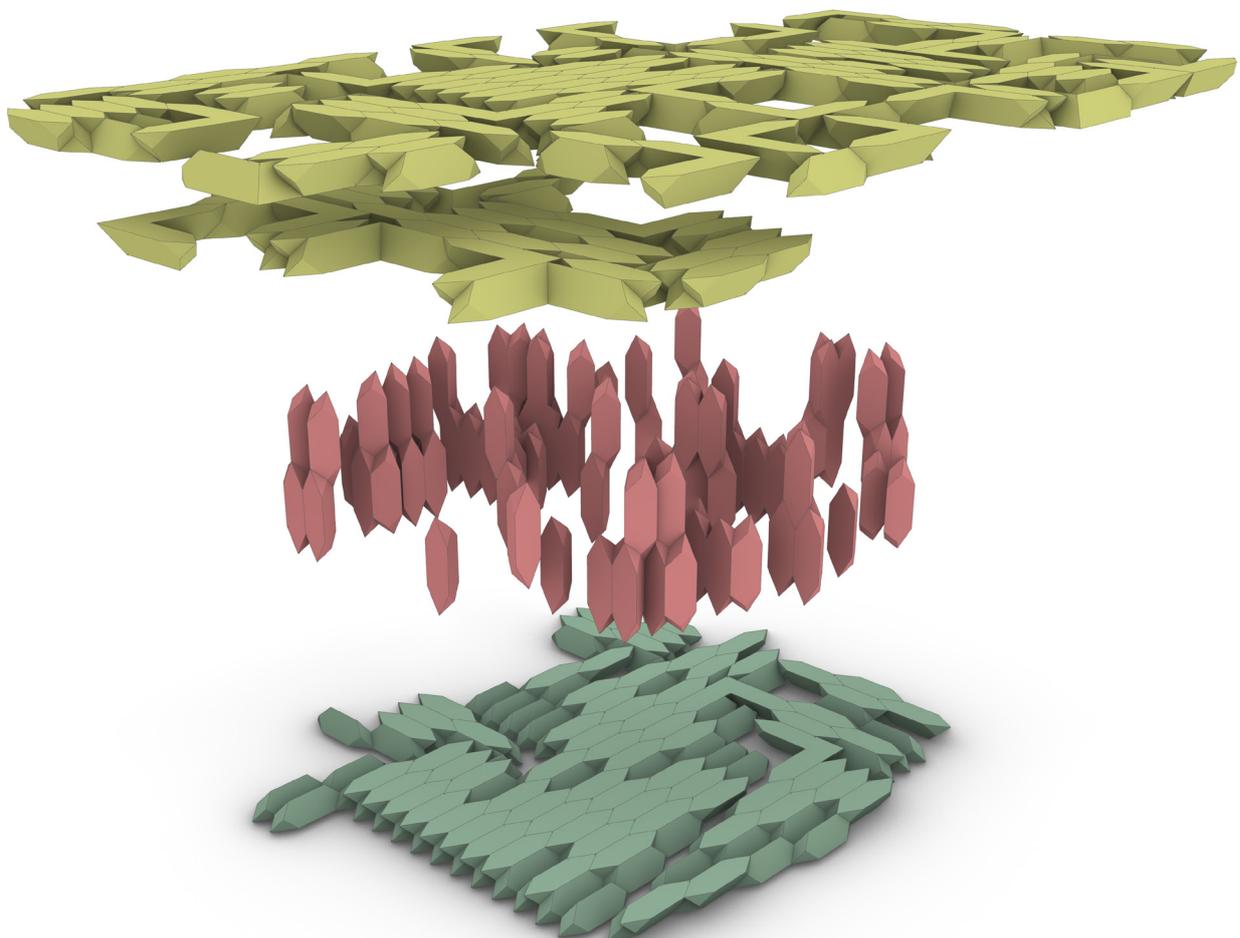


Ciononostante, l'impatto visivo con l'oggetto finale è quello di un insieme compatto e imponente, data anche la mole delle parti che lo compongono.

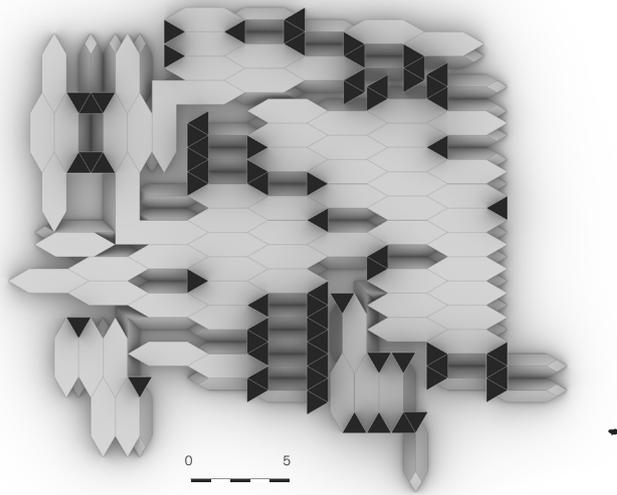


Vista assonometrica

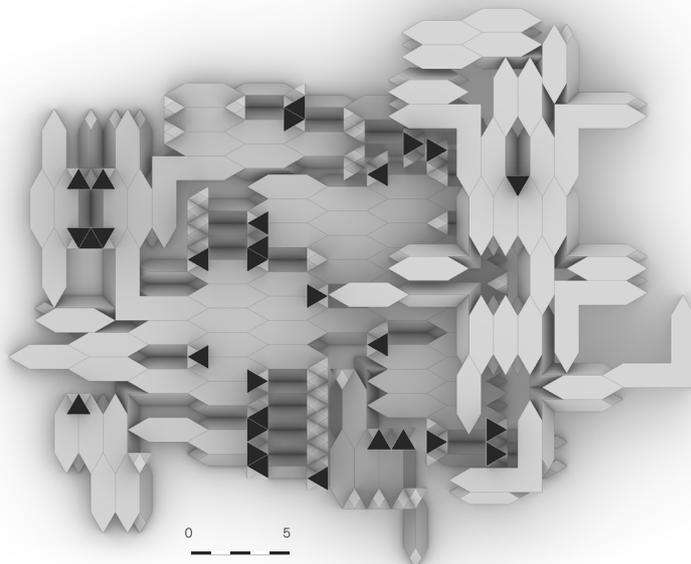
Spaccato assonometrico



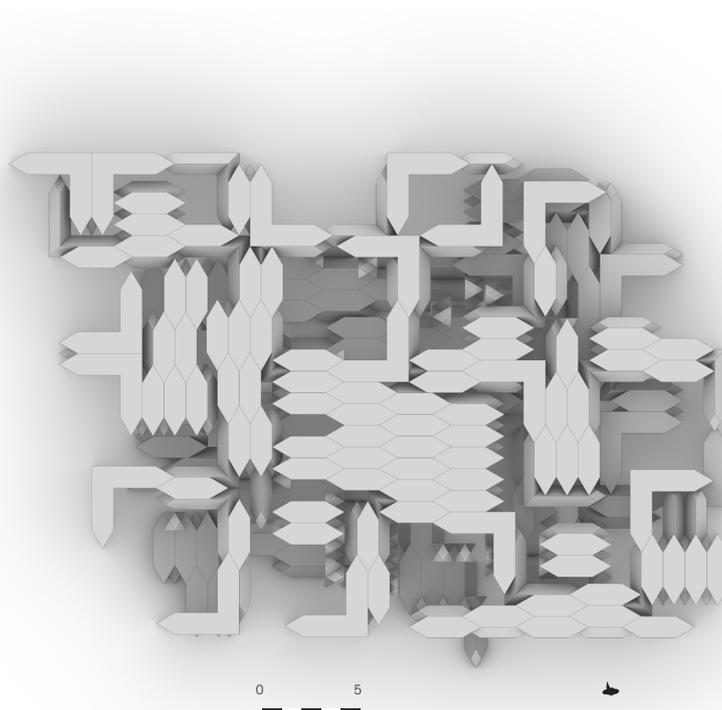
Pianta livello terreno

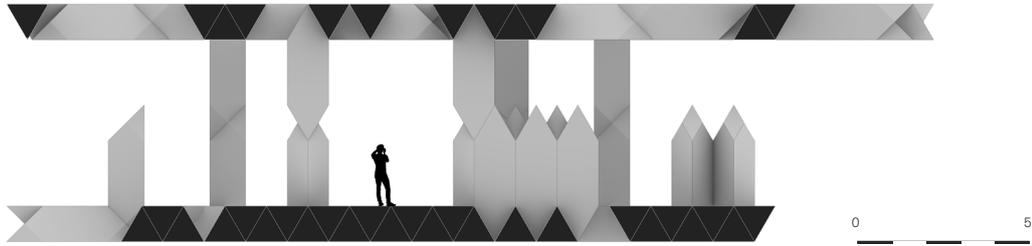
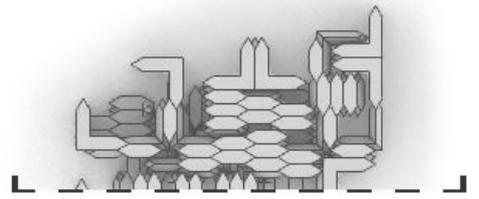


Pianta livello sopraelevato

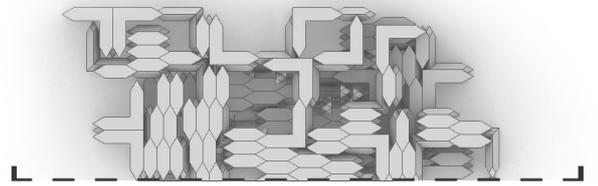


Pianta copertura

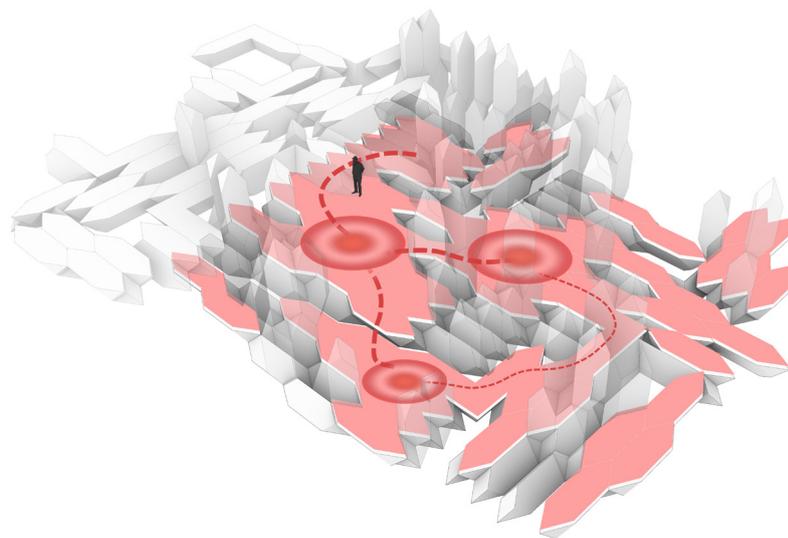




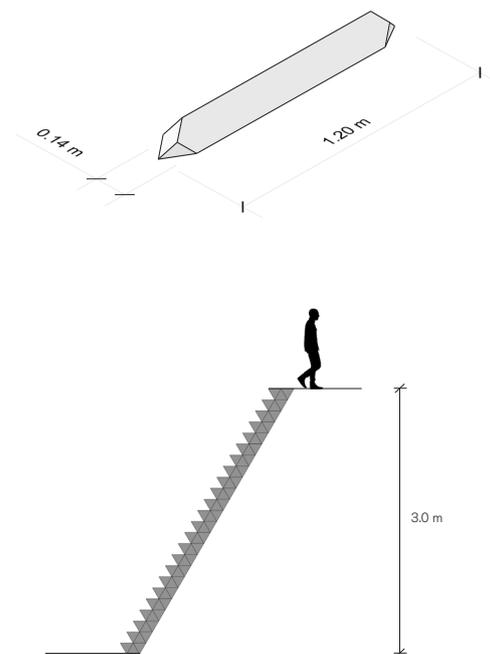
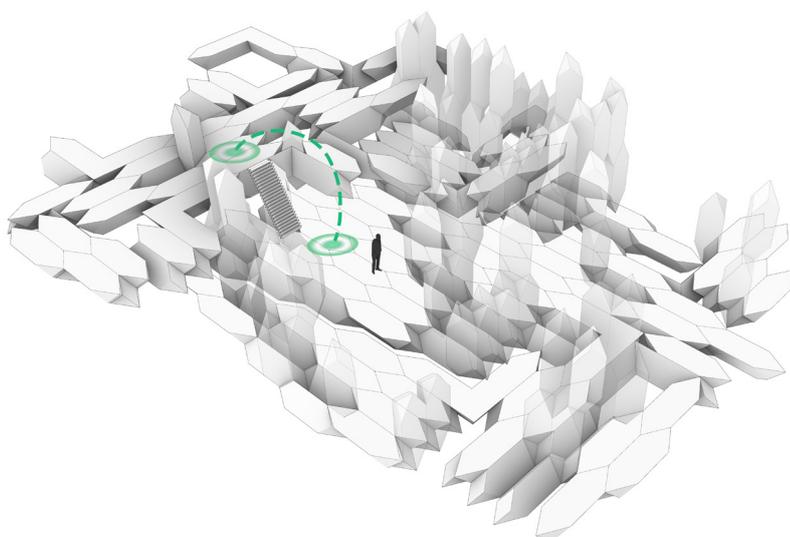
Sezione trasversale

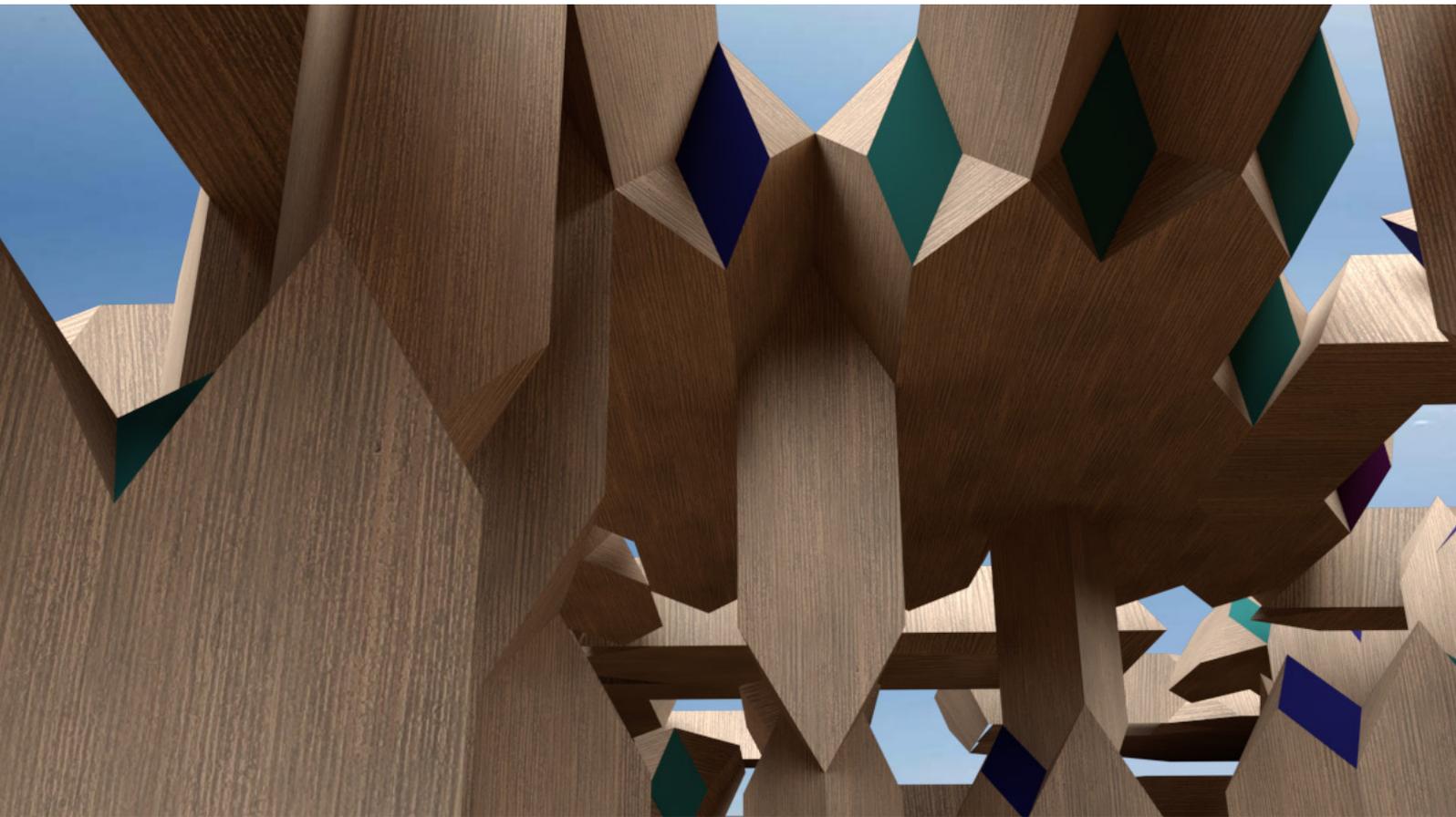


Sezione longitudinale

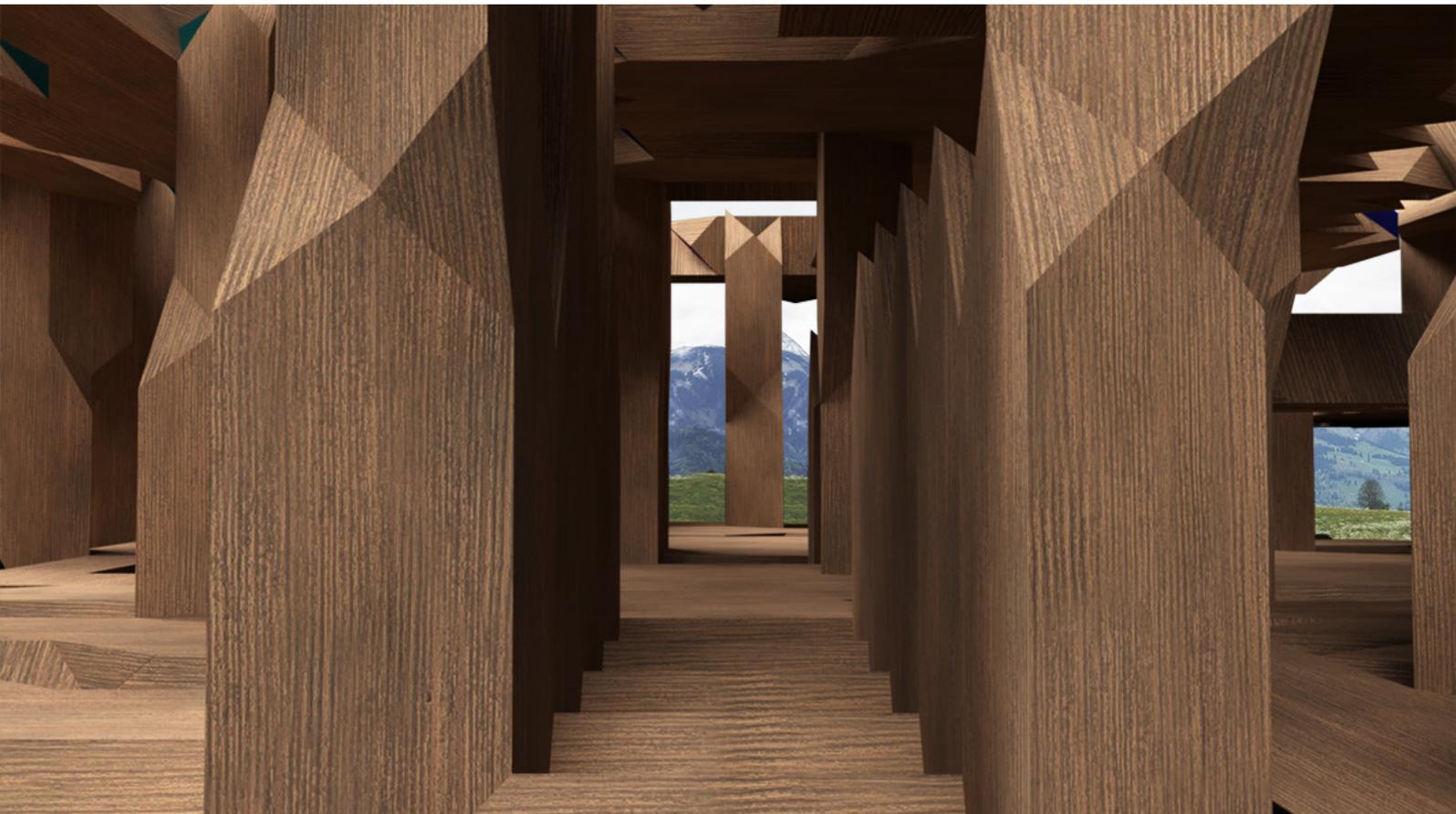


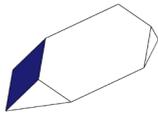
Vista la capacità del sistema di generare spazi sopraelevati si considera la possibilità di prevedere connessioni verticali post assemblaggio. Le connessioni vengono realizzate con la stessa parte ridimensionata per poter essere fruibile come scala.





Si riconoscono e si isolano all'interno dell'oggetto finale dei momenti significativi, dovuti alle strategie che l'assemblaggio ha adottato nelle sue iterazioni. Sono stati utilizzati colori differenti per segnalare l'impiego di diverse parti.

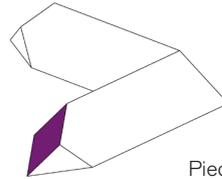




Piece A



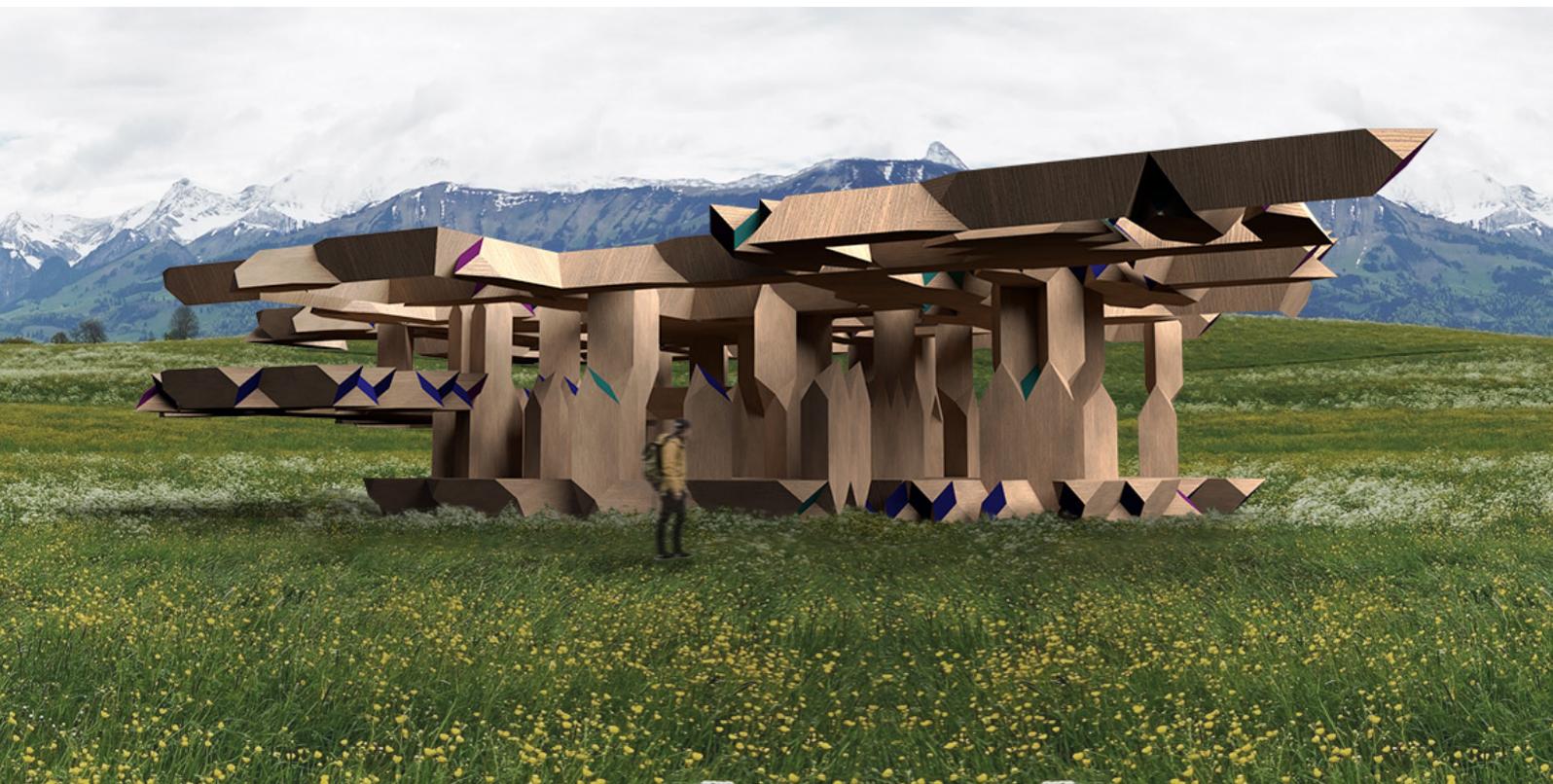
Piece ASwitch



Piece B













## 5. Conclusioni

Con questa tesi si sono volute esplorare le possibilità architettoniche di un sistema che non lavora nel paradigma degli elementi specifici ma con elementi generici che creano una tettonica differenziata grazie al ruolo che assumono all'interno dell'assemblaggio.

Si riconosce al termine del lavoro di ricerca la tendenza del sistema a generare spazi aperti: la qualità degli stessi è ascrivibile alle strategie che il sistema adotta nell'accrescimento. Un limite riscontrato è la necessità di imporre alcuni limiti volumetrici per ottenere dei risultati coerenti dal punto di vista architettonico. Si nota invece una spiccata capacità del sistema di generare momenti architettonici variegati nelle loro caratteristiche, merito della strategia compositiva dell'assemblaggio e delle proprie regole.

Le informazioni che il sistema fornisce per quanto riguarda la struttura guidano il procedere dell'assemblaggio, ma non vi sono delle conferme a posteriori della validità della struttura. Un futuro sviluppo della ricerca in tal senso restituirebbe un quadro più completo del sistema ideato.

Si rimarca la capacità esplorativa del sistema di generare una moltitudine di suggestioni architettoniche attraverso le spazialità che la strategia dell'assemblaggio offre.



## Bibliografia

Carpo, Mario. *Breaking The Curve. Big Data and Digital Design*. ArtForum 52, 2014, 168-173.

De Landa, Manuel. *A new philosophy of society: assemblage theory and social complexity*. London: Continuum, 2006.

Holland, John H. *Emergence*. Philosophica 59, 1997, 11-40.

Johnson, Steven. *Emergence: the connected lives of ants, brains, cities, and software*. New York: Scribner. 2001.

Leach, Neil. *There Is No Such Thing as a Digital Building*. AD 89.2, 2019, 136.

Livesey, Graham. "Assemblage." In *The Deleuze Dictionary*, edited by Adrian Parr, Edinburgh: Edinburgh University Press, 2010, 18-19.

Murphy, Douglas. *Last Futures - Nature, Technology and the End of Architecture*. London: Verso, 2016.

Popescu, George A., Tushar Mahale, and Neil Gershenfeld. *Digital materials for digital printing*. Society for Imaging Science and Technology, 2006.

Retsin, Gilles. *Discrete And Digital*. Texas Society of Architects, 2016.

Retsin, Gilles. *Bits and Pieces*. Architectural Design 89.2, 2019, 38.

Stiny, George. *Kindergarten grammars: designing with Froebel's building gifts*. Environment and Planning B: Planning and Design 7, 1980, 409-462.

<https://www.archdaily.com>

<https://nai.hetnieuweinstituut.nl/en>

<https://www.retsin.org>

<https://urbanparasite-bricks.weebly.com>

<https://www.wikihouse.cc>

<https://pinterest.com>

<https://www.lavocedinewyork.com>

<https://wikipedia.org>



## Ringraziamenti

Voglio ringraziare:

Il Prof. Alessio Erioli, per l'attenzione e la disponibilità costante con cui ci ha seguiti, per la passione che mette nella sua ricerca che è impossibile non raccogliere.

La mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto durante questo percorso fornendomi sempre gli strumenti adatti a percorrerlo.

I compagni dell'università, perché il percorso universitario non è certo leggero, ma puoi almeno scegliere con chi creare dei momenti di leggerezza.

Gli amici di sempre, i Colimbo e tra tutti Giorgio, che mi incoraggiano da una vita e non sembrano voler smettere.

Tutte le persone vicine o lontane che hanno trovato anche solo un momento per interessarsi a questo percorso di tesi.

